

به نام خدا

افزایش و بهینه‌سازی ظرفیت میزبانی انرژی خورشیدی در شبکه‌های هوشمند

نویسنده: مصطفی بارانی



سرشناسه	:	بارانی، مصطفی، ۱۳۷۰-
عنوان و نام پدیدآور	:	افزایش و بهینه‌سازی ظرفیت میزبانی انرژی خورشیدی در شبکه‌های هوشمند/ نویسنده مصطفی بارانی
مشخصات نشر	:	کرج: موسسه نشر سیمرغ آسمان آذرگان، ۱۴۰۵.
مشخصات ظاهری	:	۱۰۳ ص: مصور، جدول، نمودار.
شابک	:	۴۵۰۰۰۰ ریال 2-923-365-978-622
وضعیت فهرست نویسی	:	فیپا
یادداشت	:	کتابنامه: ص. [۹۹] - ۱۰۳.
موضوع	:	شبکه‌های هوشمند توزیع برق Smart power grids برق نیرو -- ذخیره Electric power -- Conservation تولید برق از انرژی خورشیدی Photovoltaic power generation انرژی‌های پایان‌ناپذیر -- مدیریت Renewable energy sources -- Management الگوریتم‌های فراابتکاری -- کاربردهای صنعتی Metaheuristics -- Industrial applications
رده بندی کنگره	:	TK۲۱۰۵
رده بندی دیویی	:	۶۲۱/۳۱۹
شماره کتابشناسی ملی	:	۱۰۵۴۳۳۸۱

افزایش و بهینه‌سازی ظرفیت میزبانی انرژی خورشیدی در شبکه‌های هوشمند

نویسنده: مصطفی بارانی

موسسه نشر سیمرغ آسمان آذرگان

نوبت چاپ: اول ۱۴۰۵

چاپ و لیتوگرافی: چاپ سه چاپ

شمارگان: ۵۰۰

قیمت: ۴۵۰۰۰۰ ریال

شابک: 2-923-365-978-622

آدرس

تهران- انتهای همت غرب (خرازی)، میدان طبیعت، مجتمع کوهستان، بلوک جدید، طبقه ۴، D8 واحد ۱۵



فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۷
فصل اول - مبانی شبکه‌های توزیع هوشمند و نقش ذخیره‌سازهای انرژی.....	۹
مقدمه	۹
چالش‌ها و الزامات بهره‌برداری از منابع فتوولتائیک در شبکه‌های توزیع	۱۴
نقش ذخیره‌سازهای انرژی در بازاریابی و بهبود عملکرد شبکه توزیع	۱۶
جمع‌بندی	۲۱
فصل دوم- شناخت موضوع و مرور مطالب مرتبط.....	۲۳
مقدمه	۲۳
نقش ذخیره‌سازهای انرژی در بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع فعال	۲۴
بررسی مطالعات گذشته	۲۵
فصل سوم- روش و بیان مسئله.....	۳۵
مقدمه	۳۵
مدل‌سازی ذخیره ساز	۳۸
مدل‌سازی تولیدات پراکنده	۴۴
مدل‌سازی سیستم خورشیدی پشت بامی به عنوان گره PQ	۴۵
مدل‌سازی سیستم خورشیدی پشت بامی به عنوان نوع PV	۴۶
مدل خورشیدی	۴۶
مدل‌سازی بار	۴۸
مدل توان ثابت	۴۸
مدل جریان ثابت	۴۸
مدل امپدانس ثابت	۴۸
مدل ترکیبی	۴۹
مدل نمایی	۴۹
تقسیم‌بندی مصارف مختلف	۵۰
پخش بار در شبکه توزیع شعاعی	۵۱
روش پسرو و پیشرو	۵۲
الگوریتم برای روش پسرو و پیشرو	۵۳

الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی	۵۴
ظرفیت میزبانی	۵۶
ظرفیت میزبانی عملیاتی	۵۹
تحلیل ظرفیت میزبانی در شبکه توزیع با رویکرد ارزیابی ذخیره ساز	۶۲
مطالبان و تأمین‌کنندگان ظرفیت میزبانی	۶۴
تعریف و ارزیابی شاخص ظرفیت میزبانی	۶۶
فرمول‌بندی مسئله	۶۹
تابع هدف	۶۹
محدودیت‌های عملکردی	۷۱
روش حل	۷۴
فصل چهارم - شبیه‌سازی و نتایج	۷۷
مقدمه	۷۷
مطالعات موردی و تجزیه و تحلیل	۷۸
سیستم ۳۳ گره IEEE	۷۹
شبیه‌سازی	۸۲
فصل پنجم - جمع‌بندی و افق‌های پیش‌رو در توسعه شبکه‌های توزیع فعال	۹۵
فهرست مراجع	۹۹

پیشگفتار

گسترش روزافزون فناوری‌های نوین در صنعت برق و حرکت نظام‌های انرژی به سمت توسعه پایدار، سبب شده است که بهره‌گیری از منابع تولید پراکنده، به‌ویژه سامانه‌های فتوولتائیک، به یکی از مهم‌ترین رویکردهای توسعه شبکه‌های توزیع تبدیل شود. این منابع علاوه بر کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، نقش مؤثری در بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه‌های قدرت ایفا می‌کنند. در این میان، استفاده از سامانه‌های خورشیدی پشت‌بامی به دلیل دسترسی آسان، قابلیت توسعه گسترده و سازگاری با سیاست‌های توسعه انرژی پاک، با استقبال فراوانی روبه‌رو شده است. با وجود مزایای فراوان، نفوذ بالای منابع فتوولتائیک در شبکه‌های توزیع، چالش‌های فنی و بهره‌برداری متعددی را نیز به همراه داشته است. ماهیت متناوب و وابستگی این منابع به شرایط جوی، موجب بروز نوسانات توان، مشکلات پایداری ولتاژ و محدودیت در ظرفیت میزبانی شبکه می‌شود. از این رو، یافتن راهکارهایی برای مدیریت بهینه این منابع و افزایش توان شبکه در پذیرش انرژی‌های تجدیدپذیر، به یکی از دغدغه‌های اصلی پژوهشگران و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت تبدیل شده است.

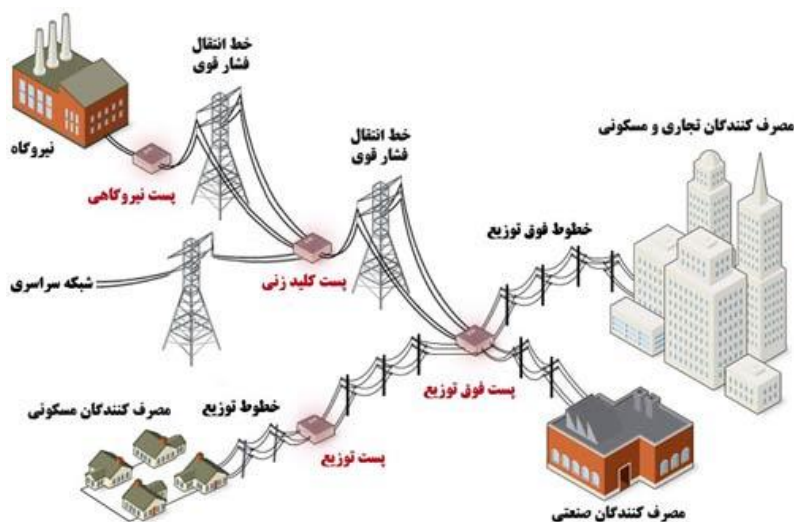
در سال‌های اخیر، بهره‌گیری از ذخیره‌سازهای انرژی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع مورد توجه ویژه قرار گرفته است. این تجهیزات با قابلیت ذخیره و تبادل توان اکتیو و راکتیو، امکان مدیریت مناسب توان، کاهش تراکم خطوط، بهبود پروفیل ولتاژ و افزایش ظرفیت میزبانی شبکه را فراهم می‌کنند. همچنین، استفاده صحیح از ذخیره‌سازها می‌تواند زمینه بهره‌برداری حداکثری از منابع خورشیدی پشت‌بامی را مهیا ساخته و عملکرد اقتصادی و فنی شبکه را بهبود بخشد.

کتاب حاضر با هدف بررسی نقش ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه‌های توزیع دارای منابع فتوولتائیک پشت‌بامی تدوین شده است و تلاش دارد با ارائه دیدگاهی کاربردی و علمی، راهکارهایی برای افزایش ظرفیت میزبانی شبکه و ارتقای شاخص‌های بهره‌برداری ارائه دهد. امید است مطالب ارائه‌شده بتواند برای دانشجویان، پژوهشگران و فعالان حوزه سیستم‌های قدرت و انرژی‌های تجدیدپذیر مفید و راهگشا باشد و گامی هرچند کوچک در مسیر توسعه شبکه‌های هوشمند و پایدار آینده به شمار آید.

فصل اول - مبانی شبکه‌های توزیع هوشمند و نقش ذخیره‌سازهای انرژی

مقدمه

سیستم قدرت الکتریکی بیش از چندین دهه است که توسط نیروگاه‌های متمرکز، سیستم‌های انتقال و شبکه‌های توزیع شکل گرفته است. با این حال در ابتدا، نیروگاه‌های برق در مجاورت مصرف‌کنندگان ساخته می‌شد اما با افزایش سریع تقاضای برق، این طرح توسط شبکه برق سراسری یکپارچه جایگزین شد. در سیستم‌های الکتریکی امروزی، انرژی در نیروگاه‌های بزرگ به شکل سه فاز برای دستیابی به برق ثابت تولید می‌شود؛ سپس توسط ترانسفورماتورها به سطح ولتاژ بالا افزایش یافته و توسط سیستم انتقال به شبکه توزیع رسیده و با کاهش سطح توان و ولتاژ، به مصرف‌کنندگان تحویل داده می‌شود. شکل (۱-۱) شمای مختصری از سیستم برق متعارف را نشان می‌دهد. نیروگاه‌های بزرگ برق معمولاً نزدیک به منابع اولیه یا دور از مناطق پرجمعیت واقع شده‌اند. بنابراین، سیستم‌های الکتریکی متداول معمولاً دارای انرژی انبوه برای فواصل طولانی در سیستم‌های انتقال هستند که باعث اتلاف توان قابل توجه و هزینه‌های ساخت مربوطه می‌شود [۱].



شکل (۱-۱): ساختار سیستم های قدرت انرژی از تولید تا مصرف [۱]

تقاضای برق به دلایل افزایش جمعیت، توسعه اقتصاد و... سریعترین رشد را در کل اقسام انرژی جهانی دارد. تقاضای برق جهانی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۱ بیش از ۵۰ درصد افزایش یافته است و انتظار می‌رود طبق روند فعلی بیش از ۸۰ درصد از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۰ افزایش یابد. با افزایش سریع مصرف برق، ذخایر سوخت‌های فسیلی در آینده نزدیک به مقدار زیادی مصرف خواهد شد. علاوه بر این، گرچه برق باعث پیشرفت بسیاری در زندگی انسان شده است، اما تولید آن باعث انتشار گازهای گلخانه‌ای و کربن می‌شود. از طرفی تغییرات آب و هوایی جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر محیط زیست مانند آتش سوزی‌های مکرر، موج‌های شدید گرمایی و آلودگی محیطی داشته است. طی دهه‌های گذشته، تلاش‌های جهانی بسیاری برای جلوگیری از تغییر اقلیم انجام شده است. علاوه بر این، یک هدف بلند مدت برای کاهش قابل توجه انتشار آلودگی ۸۰ تا ۹۵ درصد نسبت به سال ۱۹۹۰ تا پایان سال ۲۰۵۰ ایجاد شده است. یک دلیل اصلی افزایش تقاضای برق، انتقال به آینده کم کربن است. برای دستیابی به هدف کاهش تولید کربن، گرایش به سوی منابع سیستم فتوولتائیک (انرژی خورشیدی) افزایش می‌یابد. برای نمونه می‌توان به ادغام مقیاس بزرگ حمل و نقل برقی و گرمایش خانگی بدون کربن (به عنوان نمونه پمپ‌های گرمایش برقی) اشاره کرد. به همین دلیل، تقاضای برق می‌تواند تا سال ۲۰۵۰ دو برابر شود [۱].

به منظور پاسخگویی به افزایش مداوم تقاضای برق، توسعه شبکه و احداث نیروگاه‌های جدید ضروری به نظر می‌رسد. با این حال، هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا برای مشتریان و تأثیرات منفی بر جامعه و محیط زیست، این راهکار را کمتر مناسب می‌کند. در چنین شرایطی، لازم است بدون اتکا کامل به گسترش شبکه یا با حداقل تقویت آن، به دنبال راه‌حل‌های نوآورانه باشیم. از این رو، تأمین برق پاک‌تر و کافی‌تر به یکی از الزامات غیرقابل اجتناب در سطح جهان تبدیل شده است.

تولید پراکنده به عنوان یک راهکار برای تأمین نیازهای رو به رشد برق، به تولید برق توسط ژنراتورهای غیرمتمرکز و در مقیاس کوچک اطلاق می‌شود که عمدتاً در نزدیکی مراکز مصرف نصب می‌شوند. این واحدها به جای اتصال به شبکه‌های انتقال، به شبکه‌های توزیع متصل بوده و در نتیجه ظرفیت میزبانی بالاتری نسبت به تولید متمرکز دارند و تلفات انرژی در مسیر انتقال کاهش می‌یابد.

فناوری‌های تولید پراکنده خود به دو گروه تقسیم می‌شوند: منابع تجدیدناپذیر شامل میکروتوربین‌ها، پیل‌های سوختی و توربین‌های گازی و احتراقی، و منابع تجدیدپذیر شامل سیستم‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، سلول‌های خورشیدی و بیومس. در مقایسه با سیستم‌های قدرت سنتی، سیستم‌های تولید پراکنده دارای مزایایی از جمله موارد زیر هستند: [۲]:

- سازگاری با محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای
- افزایش بازده انرژی
- ظرفیت میزبانی بالاتر
- ارتقای قابلیت اطمینان سیستم
- به تعویق انداختن نیاز به تقویت زیرساخت‌های شبکه
- تأمین توان متناسب با بار شبکه
- کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای
- امکان اتصال منابع فتوولتائیک پشت‌بامی
- تجدید ساختار و افزایش رقابت‌پذیری در بازار انرژی
- زمان نصب و راه‌اندازی کوتاه
- آزادسازی ظرفیت سیستم‌های انتقال و توزیع، از جمله خطوط و پست‌ها
- قابلیت بهره‌برداری به صورت مجزا یا متصل به شبکه

- توزیع متعادل بار در شبکه
- اصلاح ولتاژ
- کاهش تلفات توان

اتصال واحدهای تولید پراکنده در برخی پست‌های شبکه، با تنظیم جهت جریان و توزیع بار، می‌تواند عدم تعادل انتقال توان ناشی از تفاوت ضریب انتقال بخش‌های مختلف شبکه را بهبود بخشد. استفاده از منابع تولید پراکنده منجر به کاهش بار مشاهده‌شده توسط تولیدکننده و به تبع آن کاهش افت ولتاژ در خطوط انتقال می‌شود. بهره‌گیری از این منابع به دلیل کاهش جریان انتقالی از ژنراتورهای بزرگ به سمت ترانسفورماتورهای توزیع و کاهش افت ولتاژ، موجب کاهش تلفات توان در شبکه می‌گردد. این مزیت همچنین اثرات جانبی مثبتی مانند کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید را به همراه دارد.

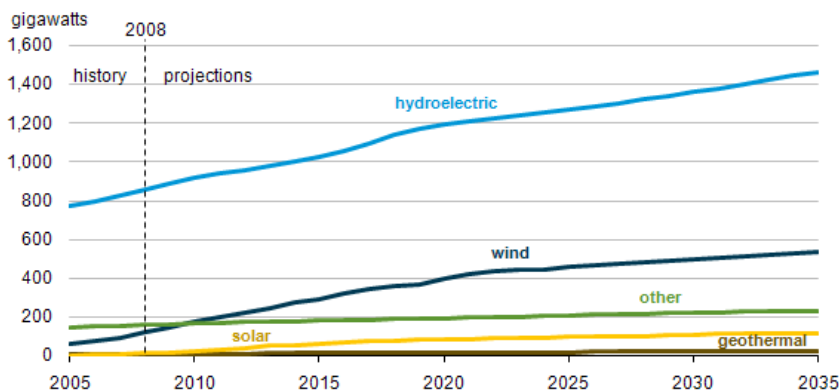
اگرچه مزایای یادشده، شرکت‌های توزیع را به استفاده از منابع تولید پراکنده تشویق می‌کند، اما بهره‌برداری ناصحیح از این منابع می‌تواند مشکلاتی را برای شبکه‌های قدرت به همراه داشته باشد. شبکه‌های توزیع در طراحی خود معمولاً این فرض را دارند که سمت اولیه پست‌های فوق‌توزیع، متصل به شبکه انتقال، تنها شامل منابع توان و ظرفیت اتصال کوتاه شبکه باشد. اتصال منابع تولید پراکنده در نقاط مختلف شبکه توزیع این فرض طراحی را نقض می‌کند و در نتیجه، وضعیت‌های بهره‌برداری جدیدی ایجاد می‌کند که در شبکه‌های قدیمی مشاهده نمی‌شوند [۲].

بیشترین چالش‌های ناشی از اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه، عمدتاً در زمینه سطح ولتاژ و هماهنگی سیستم‌های حفاظتی بروز می‌کنند. علاوه بر این، اتصال این منابع موجب افزایش پیچیدگی شبکه شده و مسائل جانبی از جمله پیچیدگی در سیستم حفاظت، طولانی‌تر شدن زمان بازیابی شبکه پس از بروز خطا و دشواری بیشتر در کنترل شبکه را به همراه دارد. از آنجا که این منابع معمولاً از طریق کنترل‌کننده‌های الکترونیکی قدرت به شبکه متصل می‌شوند، سطح هارمونیک‌ها نیز افزایش می‌یابد. در صورت اتصال حجم قابل توجهی از تولیدات پراکنده به شبکه، مشکلاتی مانند جریان معکوس، نقض محدودیت‌های ولتاژ، افزایش سطح خطا، افزایش هارمونیک‌ها و اثر فلیکر ایجاد خواهد شد [۲]. همچنین اتصال تولید پراکنده بر جریان‌های اتصال کوتاه شبکه تأثیر گذاشته و میزان جریان خطا را افزایش می‌دهد.

از منظر قابلیت اطمینان شبکه، نصب تولید پراکنده با هدف تأمین توان رزرو می‌تواند قابلیت اطمینان را بهبود بخشد؛ اما نحوه اتصال و مکان نصب این منابع نیز نقش تعیین‌کننده دارد، به طوری که انتخاب نامناسب ممکن است منجر به کاهش قابلیت اطمینان شبکه شود. در رابطه با تأثیر منابع تولید پراکنده بر ولتاژ شبکه توزیع، دو روش مرسوم برای کنترل ولتاژ شامل استفاده از تپ‌چنجرها در ترانسفورماتورهای پست و کنترل توان راکتیو با خازن‌های شنت است. در حضور تولید پراکنده، اگر خروجی این منابع به صورت هماهنگ با بار شبکه تغییر کند (به گونه‌ای که با افزایش بار، تولید پراکنده افزایش یابد و با کاهش بار، کاهش یابد)، منابع پراکنده نقش بار منفی را ایفا کرده و نوسانات ولتاژ را کاهش می‌دهند. با این حال، در برخی منابع مانند سیستم‌های فتوولتائیک و نیروگاه‌های بادی، این امکان وجود ندارد و تغییرات ولتاژ در شبکه افزایش می‌یابد [۲].

با وجود چالش‌ها، توسعه تولید پراکنده تحول چشمگیری در شبکه‌های برق ایجاد کرده است و استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک به ویژه به عنوان یکی از عوامل اصلی توسعه این منابع، مورد توجه قرار گرفته است. در سال‌های اخیر، منابع انرژی خورشیدی و بادی به شدت توسعه یافته و نقش مهمی در تولید پراکنده ایفا کرده‌اند. با توجه به گرایش‌های جهانی به سمت کاهش کربن، پیش‌بینی می‌شود که تولید پراکنده از طریق سیستم‌های فتوولتائیک نقش کلیدی در سیستم برق آینده ایفا کند، مشروط بر اینکه در مکان و ظرفیت مناسب نصب شوند.

مطابق آمار و شکل (۱-۲)، در سال ۲۰۱۹ حدود ۱۱ درصد از انرژی اولیه جهانی از طریق فناوری‌های سیستم فتوولتائیک پشت‌بامی تأمین شده است. همچنین در سال ۲۰۱۷، نسبت برق تولید شده از منابع فتوولتائیک پشت‌بامی به کل تولید برق ۲۹,۳ درصد و در سال ۲۰۱۶ معادل ۲۴,۵ درصد بوده است.



شکل ۲-۱: تولید انرژی ناشی از منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی [۳].

از سال ۲۰۱۰، انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی، باد و خورشید سهم عمده‌ای از افزایش تولید برق را دارند، این منابع بسیار مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند. با این حال، هنوز روند امیدوارکننده‌ای از افزایش تولید پراکنده از منابع سیستم فتوولتائیک وجود دارد [۳].

چالش‌ها و الزامات بهره‌برداری از منابع فتوولتائیک در شبکه‌های توزیع

با وجود مزایای متعدد، ورود تولید پراکنده به شبکه توزیع با برخی محدودیت‌ها و چالش‌ها نیز همراه است. ماهیت متغیر تولید، ایجاد جریان توان دوطرفه در شبکه، نامتعادل شدن ولتاژ و جریان، افت یا افزایش ولتاژ و افزایش تلفات از جمله این چالش‌ها هستند؛ مشکلات ولتاژ و تلفات از جمله مسائل قدیمی در شبکه‌های توزیع به شمار می‌آیند. علاوه بر این، قابلیت اطمینان یکی از مؤلفه‌های کلیدی عملکرد سیستم محسوب می‌شود. بر اساس تعریف IEEE، قابلیت اطمینان سیستم توزیع عبارت است از توانایی سیستم برای عملکرد مناسب در شرایط مشخص شده، در مدت زمان تعیین شده و بدون بروز خرابی. توجه ویژه به قابلیت اطمینان ضروری است، زیرا بیشترین میزان خاموشی مشترکین در سیستم توزیع رخ می‌دهد و بهبود آن از اهمیت بالایی برخوردار است [۴].

با توجه به ماهیت تصادفی و احتمالی انرژی‌های سیستم فتوولتائیک، افزایش عدم قطعیت در تولید برق، نیاز به ظرفیت میزبانی بیشتر در سیستم‌های قدرت را الزامی می‌کند. ظرفیت میزبانی مفهومی نسبتاً جدید در سیستم‌های قدرت است که شامل توانایی پایداری سیستم در تمامی بازه‌های زمانی، از میلی‌ثانیه تا یک سال، می‌شود. با گسترش تنوع منابع تولید

انرژی الکتریکی، عدم قطعیت در تغذیه و تقاضا افزایش می‌یابد و سیستم باید قادر باشد به تغییرات ناگهانی پاسخ دهد. یکی از تعاریف اولیه ظرفیت میزبانی، توانایی سیستم برای سازماندهی منابع به منظور پاسخ به تغییرات بار شبکه است؛ در این تعریف، بار شبکه به عنوان باقیمانده بار سیستم که توسط تولید پراکنده تأمین نشده، در نظر گرفته می‌شود. ظرفیت میزبانی به دلیل نرخ نفوذ محدود منابع غیرپراکنده، غالباً قابل صرف نظر کردن است و این ویژگی، جزو ویژگی‌های ذاتی سیستم محسوب می‌شود [۵].

در نتیجه، مهندسان برق در تلاش هستند تا چالش‌های متعددی، از جمله ادغام روزافزون تولید سیستم‌های فتوولتائیک، رشد مداوم تقاضای برق و نیاز به استقرار بهینه تجهیزات پرهزینه، را مدیریت کنند. این مسائل با استفاده از شبکه برق موجود قابل حل نیستند؛ از این رو، نسل جدید شبکه برق، معروف به شبکه هوشمند، در حال توسعه است تا کمبودهای شبکه‌های فعلی را برطرف سازد. سیستم‌های توزیع سنتی قادر به مدیریت مؤثر مشکلات ناشی از نفوذ بالای تولید پراکنده متناوب نیستند، به دلیل محدودیت در تنظیم و کنترل شبکه. برای مقابله با نارسایی‌های شبکه برق موجود و تضمین امنیت، کارایی و اقتصاد شبکه، نیاز به اطلاعات و داده‌های بیشتر در شبکه احساس می‌شود، که ظهور مفهوم شبکه هوشمند را امکان‌پذیر کرده است [۵].

یکی از اهداف اصلی شبکه هوشمند این است که منابع انرژی سیستم فتوولتائیک بیشتری فراهم کند. نصب تولیدات پراکنده نزدیک به مشتری نهایی منجر به کاهش انتقال توان در خطوط می‌شود، اما اگر مقدار زیادی تولید پراکنده به طور همزمان انرژی تولید کند، ممکن است منجر به ازدحام سیستم توزیع شود. به طور معمول، ظرفیت اجزای توزیع به اندازه کافی زیاد در نظر گرفته می‌شود تا از تراکم جلوگیری شود. با این حال، با توجه به قابلیت نظارت و کنترل شبکه هوشمند، بازآرایی به عنوان یک روش مؤثر برای حل مشکل ازدحام شبکه توزیع پرداخته است. ازدحام هرگاه رخ دهد، شبکه به دلیل نقض یک یا چند محدودیت قادر به جابجایی تمام معاملات مورد نظر و عملکرد مناسب نیست [۵].

برای بهبود عملکرد سیستم توزیع، بهبود انحراف ولتاژ، افزایش قابلیت اطمینان و تاب-آوری، بهبود ظرفیت میزبانی، کاهش تلفات و شرایط نامتعادل، شاخص‌هایی برای هر یک تعریف می‌شوند. روش‌های زیر در بهبود عملکرد سیستم توزیع انرژی نقش دارند:

- بازآرایی سیستم توزیع
- تولیدات پراکنده

- سکسیونر و بازبست‌های سریع
- ادوات الکترونیک قدرت
- مکان‌یابی بهینه تجهیزات
- ظرفیت‌یابی بهینه تجهیزات
- اتوماسیون کنترل هوشمند از راه دور
- تجهیزات و تکنولوژی‌های جدید مانند سیستم‌های تبدیل برق به گاز
- ذخیره‌سازهای انرژی ثابت و سیار

نقش ذخیره‌سازهای انرژی در بازآرایی و بهبود عملکرد شبکه توزیع

سیستم‌های توزیع از طریق نقاط باز (سوئیچ‌ها) به صورت الکتریکی از یکدیگر جدا می‌شوند و این نقاط به‌طور استراتژیک برای تعادل بارها و در نتیجه کاهش تلفات شبکه طراحی شده‌اند. از این رو، بازآرایی شبکه با تغییر وضعیت کلیده‌های مانور، با توجه به شعاعی بودن سیستم، امکان‌پذیر است. مطالعات متعددی برای به حداقل رساندن تلفات شبکه، بهبود مشخصات ولتاژ، متعادل‌سازی بارهای بین دو یا چند فیدر و کاهش نیاز به تقویت شبکه انجام شده است.

در عین حال، نفوذ و افزایش تعداد واحدهای تولید پراکنده، همراه با قرارگیری بهینه خازن‌های شنت، فیلترهای هارمونیک و تجهیزات الکترونیکی قدرت، می‌تواند مسئله بازآرایی شبکه را در کنترل جریان توان راکتیو و اکتیو یا هر دو برطرف کند. انتقال توان اضافی در برخی شرایط می‌تواند عملکرد تنظیمات موجود را بهبود بخشیده و ظرفیت میزبانی شبکه را افزایش دهد، که در نهایت منجر به مزایای تجمعی و کاهش بیشتر تلفات می‌شود.

یکی از راهکارهای موجود برای بازآرایی شبکه‌ها، استفاده از نقاطی است که معمولاً باز یا معمولاً بسته هستند و مسیرهای تغذیه جایگزین برای بارهایی که از پست اصلی جدا شده‌اند، فراهم می‌کنند. استفاده از نقاط معمولاً باز، سادگی سیستم شعاعی را حفظ می‌کند؛ با این حال، از آنجا که این پیوندها اغلب به صورت دستی کنترل می‌شوند، بارهای جدا شده به دلیل انتظار برای فعال‌سازی از راه دور یا عملکرد سوئیچ‌های مکانیکی، با زمان قطع طولانی مواجه می‌شوند.

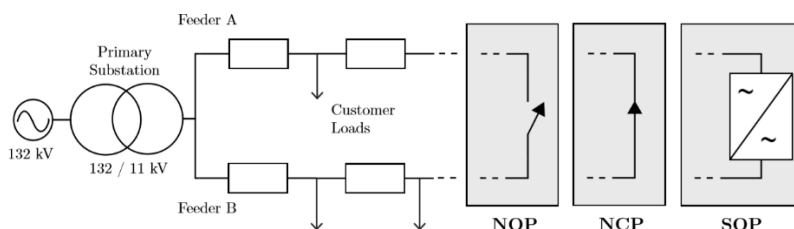
نقاط معمولاً بسته این تأخیر را کاهش می‌دهند و به‌طور معمول باعث افزایش یکنواختی بارگیری فیدر، تعادل بهتر ولتاژهای گره‌ای و کاهش کل تلفات شبکه می‌شوند. مزایای

استفاده از نقاط معمولاً بسته برای دستیابی به همان سطح قابلیت اطمینان، نیازمند طراحی محافظتی پیشرفته است که شامل سنجش اضافه جریان جهت‌دار برای تعیین دقیق مکان خطا می‌باشد. علاوه بر این، کاهش امپدانس اتصال کوتاه مشاهده شده توسط پست می‌تواند سطح جریان خطا را به میزان قابل توجهی افزایش دهد.

به همین دلیل، بسیاری از شبکه‌های توزیع در حال حاضر با نقاط معمولاً باز عمل می‌کنند تا امکان مانور شبکه حفظ شود. ارتقاء به یک سیستم معمولاً بسته یا حلقه‌ای، بدون هزینه سرمایه‌گذاری قابل توجه برای ارتقای سیستم حفاظتی، ممکن نیست. با وجود این، فن‌آوری‌های الکترونیک قدرت امکان جایگزین‌های دیگری برای تنظیم ساختار شبکه فراهم می‌کنند.

ذخیره‌سازهای انرژی (یا به اختصار ذخیره‌ساز) دستگاه‌هایی مبتنی بر الکترونیک قدرت هستند که می‌توانند به جای نقاط معمولاً باز مورد استفاده قرار گیرند و به‌طور مؤثر کمبود قابلیت تنظیم توان در سیستم‌های توزیع را جبران کنند. به جای باز یا بسته شدن نقاط معمولاً باز، ذخیره‌سازها می‌توانند با ارائه کنترل توان اکتیو و راکتیو سریع و مداوم در میان فیدرها، جریان بار را کاهش داده و مشخصات ولتاژ شبکه را بهینه کنند. در همین حال، به دلیل جداسازی پیوند DC و کنترل لحظه‌ای جریان، جریان اتصال کوتاه فراهم شده توسط ذخیره‌ساز محدود و متفاوت از مشخصات قبلی است. با هماهنگی حفاظت از شبکه توزیع، مدت زمان جداسازی خطا و بازیابی منبع می‌تواند کوتاه شود. استفاده از ذخیره‌سازها قابلیت کنترل توزیع توان را برای بهبود عملکرد سیستم با اقتصاد، ظرفیت میزبانی و قابلیت اطمینان بهتر افزایش می‌دهد.

اتصال خطوط فیدر با ذخیره‌ساز در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. این امر می‌تواند توسط ساختارهای مختلف جبران‌کننده حاصل شود. با اینکه شکل (۱-۳) قرارگیری ذخیره‌ساز در مکان سوییچگیرهای موجود را پیشنهاد می‌کند، می‌توان آن را در مقادیر مختلف و در سراسر شبکه قرار داد. ذخیره‌سازها همچنین می‌توانند برای اتصال پست‌های اصلی مختلف، به جای فیدرهای اصلی یک پست تکی، مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱-۳: یک سیستم توزیع با دو فیدر با گزینه‌های مختلف اتصال [۶]

استفاده از ذخیره سازها مزایای سیستم‌های شعاعی و مشبک را ترکیب نموده و در عین حال به طور مؤثری معایب آن را از بین می‌برد. موارد زیر از جمله ویژگی‌های اصلی ذخیره ساز است [۶]:

- پشتیبانی از بارهای جدا شده در اثر خطا در فیدر از طریق انتقال توان از یک فیدر دیگر

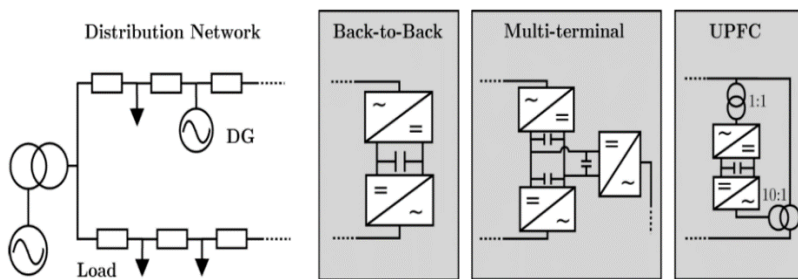
- بهبود تعادل بار فیدر و کاهش تلفات با کنترل توان حقیقی بین خطوط فیدر
- جداسازی خطاها در فیدر از دیگر فیدرهای متصل به آن
- محدود نمودن اضافه جریان
- کنترل ولتاژ سیستم با تغییر توان حقیقی و راکتیو
- تنظیم جریان توان بین فیدرهای متصل به صورت مداوم و پویا
- بهبود کیفیت توان شبکه مانند کاهش عدم تعادل ولتاژ، فلیکر و هارمونیک‌های مرتبه پایین

- این قابلیت وجود دارد که هر فیدر، بدون توجه به اختلاف ولتاژ زاویه‌ای یا نامی بین آن‌ها، به شبکه متصل شود؛ به ویژه در شرایطی که فیدرها از طریق پست‌های مختلف تغذیه می‌شوند، عملیاتی که با استفاده از کلیدهای مکانیکی امکان‌پذیر نیست.

- جریان اتصال کوتاه بر روی فیدرهای شعاعی (بدون ذخیره ساز) با استفاده از ذخیره ساز به دلیل کنترل لحظه‌ای جریان خطا تغییر نمی‌کند، این امر نشان می‌دهد که این مداخله نیازی به اصلاح مفروضات حفاظت از شبکه موجود یا به روزرسانی دستگاه‌های حفاظتی نخواهد داشت (این امر معمولاً برای یک عملیات نزدیک حلقه وجود دارد).

• کاهش اتلاف توان، متعادل کردن بارهای فیدر، بهبود مشخصات ولتاژ و در نتیجه افزایش قابلیت بارگیری شبکه و اتصالات تولیدات پراکنده

اجرای طرح ذخیره ساز جایگزین مناسبی برای سوییچ‌گیرهای قدیمی به شمار رفته و سبب سوددهی تعویق تعویض تجهیزات خواهد شد. هدف اولیه اجرای ذخیره ساز، تطبیق با گسترش شبکه و بهبود کیفیت توان (اعوجاج، هارمونیک، قابلیت اطمینان، پایداری ولتاژ) است. بدین منظور، اجرای ذخیره ساز می‌تواند جایگزینی برای روش‌های نامطلوب قدیمی از جمله بازآرایی با سوییچ‌گیرها، مشارکت تولیدات پراکنده در طرح‌های کاهش تولید، مشارکت مصرف‌کنندگان از طریق مدیریت تقاضا و بارزدایی جهت تقویت شبکه، در نظر گرفته شود. این روش‌ها برای گسترش شبکه به طور متقابل منحصر به فرد برای اجرای ذخیره ساز نیست بلکه می‌توان از آنها برای بهبود هر چه بیشتر عملکرد شبکه، در کنار یکدیگر استفاده نمود. انواع ذخیره ساز با تحقق بخشیدن به ویژگی‌های تعریف‌کننده ذخیره ساز، شامل موارد $UPFC^1$ و BTB^2 و MT^3 است که مروری بر توپولوژی این نوع ذخیره ساز در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: توپولوژی انواع مختلف [ذخیره ساز ۶].

هر یک از چیدمانها با درجه‌بندی و مقادیر کمی متفاوتی از VSC ساخته شده‌اند. به دلایل آزادی عملکرد با هر ترکیبی از توان اکتیو و راکتیو، امکان محدود (یا کنترل) کردن جریان خطا، امکان تأمین مناطق جدا شده از یک شبکه برای ذخیره ساز مناسب است.

1. Unified power flow controller
2. Back-to-Back Voltage-Sourced Converters
3. Multi-Terminal Voltage-Sourced Converters

این پایان‌نامه بر روی ذخیره ساز مبتنی بر BTBVSC متمرکز است. این شامل دو VSC است که از طریق یک پیوند DC مشترک متصل می‌شوند و یک دستگاه مبدل AC/AC ناهمزمان را تشکیل می‌دهند. ترانسفورماتورهای کوپلینگ معمولاً هر VSC را با تغذیه‌کننده متصل می‌کنند. با این حال، توپولوژی‌های بدون ترانسفورماتور قابل پیاده‌سازی است، که باعث کاهش اندازه و وزن دستگاه می‌شود. به این ترتیب امکان تبادل توان اکتیو بین قسمت‌های جلویی AC و همچنین تنظیم توان راکتیو مستقل در هر ترمینال رابط را فراهم می‌کند. در شرایط غیر عادی شبکه، می‌توان خطای یک فیدر را از طریق فیدر دیگر توسط پیوند DC جدا کرد. جریان خطا در رابط VSC طرف خطا نیز می‌تواند با استراتژی کنترل مناسب محدود شود. ترمیم پس از خطا با تأمین بارهای جدا شده در یک فیدر با انتقال توان از فیدر مجاور از طریق VSC ها امکان پذیر است [۷].

ذخیره ساز مبتنی بر VSC چند ترمیناله توسعه یافته ذخیره ساز مبتنی بر BTBVSC است که در آن VSC های اضافی به یک پیوند DC مشترک متصل می‌شوند. تعداد VSC های مرتبط با ذخیره ساز مبتنی بر VSC چند ترمینال سه یا بیشتر تعریف شده است. همان ویژگی‌هایی که برای BTBVSC مورد بحث قرار می‌گیرد، برای چند ترمیناله قابل استفاده است. نوع دیگر ذخیره سازهای مبتنی بر UPFC، همچنین به عنوان VSC های سری شنت شناخته می‌شوند، از دو VSC با یک پیوند DC مشترک تشکیل شده است. یک VSC در UPFC به صورت سری و دیگری با شنت با فیدرهای متصل اتصال می‌شود. مزیت اصلی ذخیره سازهای مبتنی بر UPFC، پتانسیل القای جریان توان بیشتر از نرخ VSC است. با این حال، این توانایی نه تنها توسط درجه‌بندی دستگاه، بلکه توسط توپولوژی شبکه، محدودیت‌ها و نقطه کار و همچنین قرارگیری دستگاه تعیین می‌شود. یک نقطه ضعف ذاتی برای UPFC این واقعیت است که فیدرهای متصل به UPFC توسط یک پیوند DC جدا نمی‌شوند و از این رو، اختلالات یا خطاهای موجود در یک فیدر متصل بر دیگری تأثیر می‌گذارد مگر اینکه استراتژی کنترلی برای رد یا جبران آن تدوین شود. برای اغتشاشات، محدود کردن جریان خطا به قیمت مرتبه بالاتر دستگاه، امکان پذیر است. اتصال نیز همزمان نیست و بنابراین دو شبکه الکتریکی متصل شده از طریق ذخیره ساز مبتنی بر UPFC باید همزمان باشند.

جمع‌بندی

در این کتاب، موضوع مکان‌یابی و تعیین تنظیمات مناسب ذخیره‌سازهای انرژی در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ گره IEEE مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی، بهبود عملکرد شبکه توزیع از طریق کاهش تلفات توان، ارتقای کیفیت ولتاژ، متعادل‌سازی بار فیدرها، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود ظرفیت میزبانی شبکه در حضور منابع فتوولتائیک پشت‌بامی است.

در ابتدا، مفهوم ظرفیت میزبانی و اهمیت آن در شبکه‌های توزیع مدرن تشریح شده و نقش آن در بهره‌برداری ایمن و پایدار از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد توجه قرار می‌گیرد. سپس، شاخص تراکم بار به‌عنوان یکی از معیارهای مهم ارزیابی وضعیت شبکه معرفی می‌شود تا از طریق آن بتوان میزان توانایی شبکه در پذیرش منابع جدید تولید پراکنده را بررسی کرد.

در ادامه، ذخیره‌سازهای انرژی به‌عنوان ابزاری مؤثر برای مدیریت توان و بهبود ساختار بهره‌برداری شبکه معرفی می‌شوند. این تجهیزات با تغییر آرایش شبکه و کنترل جریان توان، می‌توانند از ایجاد تراکم در خطوط جلوگیری کرده و شرایط بهره‌برداری شبکه را بهبود بخشند. همچنین، مدل‌سازی اجزای مختلف سیستم شامل منابع خورشیدی پشت‌بامی و ذخیره‌سازهای انرژی انجام شده و چارچوبی برای تحلیل عملکرد شبکه ارائه می‌شود.

در بخش پایانی نیز، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی و الگوریتم CPLEX، راهکاری برای تعیین محل مناسب و ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها ارائه شده است تا ضمن رعایت محدودیت‌های فنی شبکه، عملکرد کلی سیستم توزیع بهبود یابد و امکان استفاده حداکثری از انرژی‌های تجدیدپذیر فراهم شود.

فصل دوم - شناخت موضوع و مرور مطالب مرتبط

مقدمه

در سال‌های اخیر، نفوذ زیاد واحدهای تولید پراکنده و خودرو برقی می‌تواند به کاهش تلفات برق، بهبود قابلیت اطمینان منبع تغذیه، ارتقا اقتصادی، کاهش انتشار CO2 و غیره کمک کند. در حالی که چالش‌های جدیدی برای برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سیستم‌های توزیع نیز از جمله افزایش تلفات، تجمع اعوجاج هارمونیک، اضافه بار تجهیزات، مشکلات کیفیت ولتاژ، خطر بالاتر ازدحام شبکه، انحراف ولتاژ و جریان توان دو جهت ایجاد شده است [۲]. بنابراین، فضای قابل توجهی برای پیشرفت وجود دارد. سیستم‌های توزیع نمی‌توانند به طور موثر به مشکلات ناشی از نفوذ زیاد تولید پراکنده متناوب بپردازند؛ زیرا محدودیت عملکردی زیادی دارند. بنابراین برای مقابله با این چالش‌ها، تحقق بخشیدن به سیستم‌های توزیع برق انعطاف‌پذیر با نفوذ زیاد انرژی‌های سیستم فتوولتاییک پشت بامی و تضمین عملکرد قابل اطمینان و کارآمد شبکه، برداشت و اقدامات جدیدی لازم است.

اپراتورهای شبکه‌های انتقال و توزیع با شناسایی منابع تلفات شبکه و اتخاذ راه‌حل‌های مناسب برای کاهش آن‌ها، هزینه‌های عملیاتی و برنامه‌ریزی سیستم‌های توزیع را در حداقل میزان نگه می‌دارند. منابع تولید پراکنده فتوولتاییک پشت بامی، از جمله انرژی خورشیدی، با ارائه تولید پایدار و سازگار با محیط زیست، به عنوان گزینه‌های جایگزین مورد توجه قرار می‌گیرند. با این حال، موفقیت در یکپارچه‌سازی این منابع در شبکه‌های توزیع مدرن، تا حد زیادی وابسته به پیشرفت بازارهای ذخیره‌سازی انرژی و تدوین قوانین بهبود یافته برای تشویق استفاده گسترده‌تر از سیستم‌های ذخیره انرژی همراه با منابع تجدیدپذیر است.

نقش ذخیره‌سازهای انرژی در بهبود عملکرد شبکه‌های توزیع فعال

شبکه‌های توزیع موجود معمولاً روش‌های تنظیم متعارف را بر اساس تجهیزات اولیه مانند تعویض تپ بار، بانک‌های خازن و کلیدهای مانور در نظر می‌گیرند. با این حال، تجهیزات تنظیم‌کننده اولیه موجود نمی‌توانند نیاز مداوم کنترل ولتاژ شبکه‌های توزیع را با ظرفیت‌های بالای تولید پراکنده و خودرو برقی برآورده کنند. نفوذ روز افزون تولید پراکنده می‌تواند سهم مثبتی در ارتقا اقتصادی و بهبود قابلیت اطمینان منبع تغذیه داشته باشد. با این حال، خروجی‌های متناوب برق از تولیدات پراکنده همراه با منابع مختلف طرف تقاضا، عدم اطمینان قابل توجهی در توزیع مکانی و زمانی دارند. این عدم قطعیت‌ها در شبکه افزون شده و در نهایت ویژگی‌های عدم قطعیت پیچیده کل سیستم را تشکیل می‌دهند. در نتیجه چالش‌های زیادی مانند جریان معکوس را در عملکرد سیستم توزیع فعال به وجود آورده و نیاز بیشتری برای ظرفیت میزبانی عملیاتی در سیستم توزیع فعال ایجاد می‌کند.

با استفاده از دستگاه‌های کیفیت توان می‌توان عملکرد یک سیستم را با محدود کردن ناکارآمدی در نحوه انتقال برق، کاهش اعوجاج هارمونیک، کاهش عدم تعادل شبکه، بهبود ضریب توان و کاهش تلفات بهبود داد [۱۰]. روش دیگر برای بهبود عملکرد سیستم، بازآرایی سیستم قدرت برای ارائه یک چارچوب انعطاف‌پذیر برای انتقال بارهای الکتریکی بین فیدرها، در نتیجه کاهش تلفات و بهبود تراکم بارها است. برنامه‌های تقویت شبکه از جمله در نظر گرفتن برنامه‌های پاسخ تقاضای پیشرفته برای برنامه‌ریزی مجدد مصرف انرژی و بهبود قابلیت اطمینان و اختصاص واحدهای تولید پراکنده و دستگاه‌های الکترونیک قدرت در شبکه توزیع برای کنترل انتقال انرژی بین فیدرهای بهم پیوسته و کاهش اتلاف انرژی به طور کارآمد در نظر گرفته شده است. با این حال، اطمینان از اتصال تولید پراکنده یا دستگاه‌های الکترونیکی قدرت به اندازه مناسب و به مکان‌های مناسب در سیستم، کاملاً مورد بحث است [۸].

در سیستم‌های توزیع، نقاط باز (سوئیچ‌ها) به‌طور الکتریکی شبکه را از یکدیگر جدا می‌کنند و به‌صورت استراتژیک برای تعادل بارها طراحی شده‌اند تا تلفات کاهش یابد. بنابراین، با تغییر وضعیت کلیدهای مانور و رعایت قید شعاعی بودن شبکه، می‌توان بازآرایی شبکه را انجام داد. این بازآرایی در مطالعات مختلف برای کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ، متعادل‌سازی بار بین دو یا چند فیدر و کاهش نیاز به تقویت خطوط شبکه به‌کار گرفته شده است.

علاوه بر این، افزایش نفوذ تولید پراکنده همراه با جاییابی بهینه خازن‌های شنت، فیلترهای هارمونیک و تجهیزات الکترونیک قدرت، می‌تواند بازآرایی شبکه را برای کنترل جریان توان اکتیو و راکتیو تسهیل کند. انتقال توان اضافی در برخی شرایط ممکن است ظرفیت میزبانی شبکه را بهبود دهد و در نتیجه باعث تحقق مزایای تجمعی بیشتری، به ویژه کاهش تلفات، گردد [۸].

ذخیره‌سازهای انرژی (ذخیره‌ساز) دستگاه‌هایی مبتنی بر الکترونیک قدرت هستند که می‌توانند به جای نقاط معمولاً باز یا بسته مورد استفاده قرار گیرند تا پاسخ سریع و یک طرح کنترل پیشرفته برای جریان و توان بین فیدرهای مجاور که به آنها متصل هستند، فراهم کنند. چندین استراتژی مانند به حداقل رساندن تلفات انرژی یا هزینه سالانه در یک سیستم، تعادل بار، بهبود مشخصات ولتاژ و افزایش ظرفیت میزبانی انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی در سیستم‌های توزیع برای عملکرد بهینه طرح شده است. ذخیره ساز می‌تواند قابلیت کنترل و ظرفیت میزبانی شبکه‌های توزیع را افزایش داده و ظرفیت‌های بالایی از تولیدات پراکنده و خودرو برقی را برای یکپارچه سازی در شبکه‌های توزیع فعال تضمین کند [۷].

بررسی مطالعات گذشته

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای برای بررسی عملکرد شبکه‌های توزیع در شرایط عادی و گذرا انجام شده است تا راهکارهای مؤثرتری برای بهبود بهره‌برداری، افزایش پایداری و ارتقای عملکرد این شبکه‌ها ارائه شود [۳۰-۷].

در [۷]، مفهوم و انواع توپولوژی ذخیره ساز پیشنهاد شد. سه نوع توپولوژی مبدل منبع ولتاژ پشت به پشت (B2BVSC)، کنترل‌کننده جریان واحد (UPFC) و جبران‌کننده استاتیک تعریف شد.

در [۶]، برنامه‌های ذخیره ساز از نظر محل قرارگیری تولید پراکنده، تعادل بار فیدر و بهبود مشخصات ولتاژ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند و اصول عملکرد ذخیره ساز تحت هر دو شرایط عملیاتی شبکه و عادی مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات انجام شده بر روی شبکه توزیع ولتاژ متوسط، عملکرد ذخیره ساز را در شرایط مختلف کارکرد طبیعی شبکه، در هنگام بازگرداندن خطا و پس از خطا نشان داد.

در [۹] بر اساس B2BVSC های قدیمی، خازن DC با ذخیره انرژی باتری جایگزین شد، که باعث افزایش دامنه تنظیم ذخیره ساز مورد مطالعه شد.

در [۱۰]، با توجه به فرآیند گذرای خطای سیستم، حالت‌های مختلف کنترل ذخیره ساز در طی یک خطا و یک دوره پس از خطا بررسی شد.

در [۱۱] ذخیره‌ساز انرژی مبتنی بر مبدل چندسطحی مدولار مستقیم پیشنهاد شده است که هزینه و حجم سرمایه‌گذاری کل سیستم را به شکل قابل توجهی کاهش می‌دهد و این موضوع، آن را برای استفاده در شبکه‌های توزیع نزدیک به مراکز شهری مناسب‌تر می‌سازد. ساختار، اصل عملکرد و طرح کنترلی این ذخیره‌ساز نیز به‌طور مفصل توضیح داده شده است. مطالعه انجام شده در مرجع [۱۲]، تأثیر راهکارهای مختلف کنترل ولتاژ در تسهیل افزایش ظرفیت نصب تولید پراکنده پیش از وقوع انحراف ولتاژ را مورد بررسی قرار داده است. در این میان، تمرکز اصلی بر اجرای ذخیره‌ساز به عنوان راه‌حل کنترل ولتاژ بوده است.

مرجع [۱۳] یک روش برای پیکربندی بهینه ذخیره‌ساز در عملکرد سیستم توزیع فعال ارائه کرده است. در ابتدا، با توجه به ویژگی‌های تولید انرژی از سیستم‌های فتوولتائیک پشت‌بامی، سناریوهای کلاسیک بر اساس معیار فاصله واسراشتاین ساخته می‌شوند. سپس، مدل پیکربندی بهینه ذخیره‌ساز ارائه شده و برای حل آن، از تبدیل مدل مخروطی و برنامه‌ریزی مخروطی مرتبه دوم مختلط با کارایی و همگرایی بالا استفاده گردیده است.

در مرجع [۱۴] نیز، استراتژی شبکه توزیع انطباقی پیشنهاد شده است که با و بدون ذخیره‌ساز قادر به کاهش تلفات برق است. استفاده از ذخیره‌ساز در این استراتژی، موجب بهبود عملکرد شبکه و کاهش بیشتر تلفات انرژی می‌شود.

در [۱۵]، یک چارچوب تجزیه و تحلیل حالت پایدار برای تعیین کمی مزایای عملیاتی شبکه توزیع با ذخیره ساز در شرایط عادی کارکرد شبکه توسعه داده شد. یک مدل عمومی تزریق توان برای تعیین عملکرد بهینه ذخیره ساز با استفاده از روش بهبود یافته Powells Direct Set و محدودیت‌های فیزیکی و تلفات توان دستگاه‌ذخیره ساز (براساس مبدل‌های منبع ولتاژ) در مدل در نظر گرفته شد. الگوریتم‌های بازاریابی شبکه توزیع، با ذخیره ساز و بدون آن، برای شناسایی مزایای استفاده از ذخیره ساز تولید و استفاده شد. نتایج نشان داد که تنها با استفاده از یک ذخیره ساز در مقایسه با مورد استفاده از بازاریابی شبکه با همه شاخه‌های مجهز به کلیدهای از راه دور، بهبود مشابه در عملکرد شبکه حاصل شده است. در [۱۶] در یک روش کنترل ولتاژ غیرمتمرکز در ذخیره ساز بر اساس حساسیت ولتاژ پیشنهاد

شده است. این روش به طور موثر و غیرمتمرکز، بار ذخیره‌سازی و محاسبه را کاهش می‌دهد و نیازهای سریع شبکه‌های توزیع فعال در مقیاس بزرگ را برآورده می‌کند.

در مرجع [۱۷] یک طرح هماهنگ متشکل از چندین دستگاه تنظیم شده با ولتاژ مانند تپ ترانسفورماتور زیر بار و بانک‌های خازن سوئیچ شده از جمله عملیات تنظیم شبکه توزیع برای کنترل ولتاژ با حداقل هزینه عملیاتی ارائه شده است. علاوه بر این، تأثیر ذخیره ساز بررسی شده است. هدف به حداقل رساندن هزینه عملیاتی که شامل هزینه تقاضای انرژی، هزینه کارکرد تجهیزات، هزینه انتشار کربن و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری از ذخیره ساز، در حالی که محدودیت‌های عملیاتی سیستم را برآورده کند. مسئله بهینه‌سازی آن با استفاده از الگوریتم اصلاح شده بهینه‌سازی گرگ خاکستری باینری (MBGWO) حل شده است.

مرجع [۱۸] یک استراتژی کنترل هماهنگ با توجه به کلید مانور و ذخیره ساز ارائه شده است، که در آن یک مدل دو سطحی ساخته شده است. با حل مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط، هماهنگی بین کلید بین فیدری و ذخیره ساز با توجه به ویژگی‌های مختلف دو نوع دستگاه تحقق می‌یابد.

در [۱۹] یک چارچوب بهینه‌سازی چند هدفه برای بهبود عملکرد یک شبکه توزیع با تولید پراکنده و یک‌ذخیره ساز ارائه شده است. یک روش بهینه‌سازی جدید که یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چند هدفه (MOCPLEX) و یک روش جستجوی محلی را برای تعیین نقاط تنظیم بهینه ذخیره ساز، که کاهش تلفات توان، تعادل بار فیدر و بهبود مشخصات ولتاژ ادغام می‌کند.

در [۲۰]، یک روش برنامه‌ریزی چند منظوره ذخیره ساز در شبکه توزیع فعال ارائه شده است. مدل برنامه‌ریزی چند منظوره ذخیره ساز بر اساس برنامه‌ریزی دو سطح ایجاد شده است. مدل سطح بالا توسط الگوریتم ژنتیک حل شده است. مدل سطح پایین با استفاده از روش محدب به یک مدل مخروطی مرتبه دوم تبدیل می‌شود و با روش برنامه‌نویسی مخروطی مرتبه دوم حل می‌شود.

در [۲۱] یک استراتژی عملیاتی مبتنی بر ذخیره ساز را برای شبکه‌های توزیع فعال نامتعادل (سیستم توزیع فعال) پیشنهاد می‌کند. با تنظیم عملکرد ذخیره ساز، این استراتژی می‌تواند تلفات را کاهش دهد و به طور همزمان عدم تعادل سه فاز شبکه سطح بالا را کاهش دهد.

در [۲۲] یک‌ذخیره ساز به دلیل کنترل انعطاف‌پذیر و دقیق جریان‌های توان برای کاهش ولتاژ و محدودیت‌های حرارتی در شبکه‌های ولتاژ متوسط (MV) با نفوذ زیاد تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود.

در مرجع [۲۳] کاربرد ذخیره ساز در صورت بروز خطا در شبکه توزیع به منظور شناسایی، ایزوله کردن و تجدید آرایش آن قسمت از فیدرهای توزیع که دچار خطا شده‌اند، پرداخته است.

در مرجع [۲۴] ظرفیت میزبانی شبکه توزیع برای استفاده از منابع تولید پراکنده بدون ایجاد نقص در بهره‌برداری مانند از حد خارج شدن ولتاژ شین‌ها و ظرفیت گرمایی خطوط، با استفاده از ذخیره ساز بررسی شده است. این مطالعات که در زمینه کاربرد ذخیره ساز در شبکه‌های توزیع انجام گرفته، در یک محیط احتمالاتی ارزیابی نشده‌اند.

در مرجع [۲۵]، روشی بهینه برای جابجایی و تنظیم توان اکتیو و راکتیو ذخیره‌ساز در شبکه توزیع متعادل ارائه شده است. هدف از این روش کاهش تلفات توان اکتیو، متعادل‌سازی بار فیدرها و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه می‌باشد. مطالعات ارائه شده در محیطی احتمالاتی و با در نظر گرفتن همبستگی بین متغیرهای تصادفی ورودی انجام شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک به‌عنوان ابزار اصلی مورد استفاده قرار گرفته است و خوشه‌بندی داده‌ها برای ارزیابی احتمالی شبکه توزیع مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، روش تجزیه چولسکی^۱ برای مدیریت همبستگی بین متغیرهای تصادفی ورودی استفاده می‌شود.

در مرجع [۲۶] اندازه بهینه و موقعیت مکانی واحدهای تولید پراکنده را با اینورترهای هوشمند با ذخیره ساز در سیستم‌های توزیع انجام داده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی غیر محدب و غیرخطی، یک الگوریتم سریع IPOP-CMA-ES پیشنهاد شد که تخصیص بهینه تولید پراکنده می‌تواند باعث کاهش توان و کاهش انحراف ولتاژ شود، در حالی که سطح ازدحام خط نشان داده شده توسط شاخص تعادل بار به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در مرجع [۲۷] یک مدل تصادفی مبتنی بر اندازه‌گیری و مکان‌یابی ذخیره ساز برای بهبود عدم تعادل سه فاز شبکه توزیع با در نظر گرفتن کامل عدم قطعیت‌های انرژی سیستم فتوولتاییک پشت بامی توزیع شده و بارها ارائه شده است. برای حل موثر مدل بهینه‌سازی پیچیده، الگوریتم تکامل افتراقی جدیدی با مدل جایگزین کریجینگ معرفی شده است.

در مرجع [۲۸] ذخیره‌ساز و واحدهای تولید پراکنده به‌صورت همزمان و بدون نیاز به بازارایی شبکه تخصیص یافته‌اند. در این مطالعه، سهم تلفات ناشی از ذخیره‌ساز در کل تلفات اکتیو و همچنین تأثیر افزایش تعداد ذخیره‌سازهای متصل به شبکه‌های توزیع در شرایط بارگیری مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل مسئله غیرخطی مختلط و صحیح تخصیص ذخیره‌ساز و تولیدات پراکنده، از یک الگوریتم فراابتکاری نوین به نام الگوریتم جستجوی گویا-پیوسته گسسته استفاده شده و به‌علاوه، یک روش جدید بازارایی شبکه به کار گرفته شده است تا تنظیمات شعاعی به شکل کارآمد به دست آید.

در مرجع [۲۹] یک روش تخصیص بهینه هماهنگ برای تولید پراکنده، بانک‌های خازن و ذخیره‌ساز در شبکه‌های توزیع فعال ارائه شده است. مدل‌های چند حالتی برای انرژی‌های سیستم فتوولتاییک پشت بامی ابتدا با توجه به توالی زمانی ساخته شده‌اند. سپس، یک مدل برنامه‌نویسی دو سطح ایجاد شده که در آن برنامه‌نویسی محدود به شانس تعبیه شده است. مکان و اندازه تولیدات پراکنده، بانک‌های خازن و ذخیره‌ساز در سطح بالا با در نظر گرفتن حداقل هزینه سالانه به عنوان هدف بهینه شده است. در [۳۰] با توجه به ویژگی‌های عملکرد طولانی مدت تولید پراکنده، یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی عدد صحیح مختلط برای تعیین بهینه مکان و اندازه ذخیره‌ساز براساس سناریوهای عملیاتی معمولی تولید شده توسط معیار فاصله فرموله شده است. سپس به عنوان یک مدل برنامه‌نویسی مرتبه دوم صحیح مختلط تبدیل و حل می‌شود.

نفوذ روز افزون تولید پراکنده می‌تواند سهم مثبتی در ارتقا اقتصادی و بهبود قابلیت اطمینان منبع تغذیه داشته باشد. با این حال، خروجی‌های متناوب برق از آنها همراه با منابع مختلف طرف تقاضا، عدم اطمینان قابل توجهی در توزیع مکانی و زمانی دارند. این عدم قطعیت‌ها چالش‌های زیادی را در عملکرد سیستم توزیع فعال به وجود می‌آورد، مانند جریان معکوس و تخلیه ولتاژ، و نیاز بیشتری را برای ظرفیت میزبانی عملیاتی در سیستم توزیع فعال ایجاد می‌کند. ظرفیت میزبانی عملیاتی توانایی شبکه‌ها برای مقابله موثر با عدم قطعیت‌های مختلف ناشی از نفوذ زیاد تولیدات پراکنده و از بین بردن اثرات منفی آنها است [۳۱]. بنابراین، ظرفیت میزبانی به تدریج به یک مفهوم کلیدی در عملکرد سیستم توزیع فعال تبدیل شده است. با توجه به اینکه کمی‌سازی ظرفیت میزبانی دشوار است، ارزیابی کمی ظرفیت میزبانی به یک نگرانی عمده برای عملکرد سیستم تبدیل شده است.

مطالعات قبلی مشکلات ارزیابی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع فعال را بررسی کرده است. مطالعه شرح داده شد.

در [۳۲] بیشتر یک چارچوب واحد برای اندازه‌گیری ظرفیت میزبانی سیستم قدرت ارائه داد. تحت چارچوب پیشنهادی، یک معیار ظرفیت میزبانی ایجاد کرد که بیشترین دامنه تغییر عدم اطمینان را برای سیستم ارزیابی می‌کند. با این حال، به دست آوردن توزیع‌های دقیق احتمال ظرفیت میزبانی در عمل حل نشدنی است و مقادیر زیادی بار محاسباتی سنگین را تحمیل می‌کنند. روش‌های فعلی برای ارزیابی ظرفیت میزبانی، توانایی سیستم قدرت را برای کنار آمدن با عدم قطعیت‌ها از دیدگاه‌های مختلف منعکس کرده است. این روش‌ها از نظر خصوصیات شاخص‌های ارزیابی و سناریوهای کاربرد تفاوت آشکاری دارند. تحقیقات در مورد ظرفیت میزبانی شبکه توزیع با نفوذ زیاد تولید پراکنده هنوز در مرحله اولیه است. از نظر خصوصیات شاخص، ارتباطات بین شاخص‌های ارزیابی موجود و سطح نفوذ تولید پراکنده و همچنین امنیت سیستم باید بیشتر روشن شود.

بنابراین، ارزیابی ظرفیت میزبانی شبکه توزیع فعال باید ظرفیت میزبانی تولید پراکنده و نوسانات تولیدات پراکنده را در نظر بگیرد. برخی از مباحث در مورد بهبود ظرفیت میزبانی تولید پراکنده در منابع وجود دارد. جدا از ارزیابی سطح نفوذ تولید پراکنده، برخی از مطالعات بر استفاده از سایر فناوری‌های یکپارچه شبکه توزیع برای افزایش ظرفیت میزبانی تولید پراکنده‌ها تمرکز دارند. قابلیت کنترل، پایه‌ای برای تحقق ظرفیت میزبانی سیستم است که با کاربرد گسترده الکترونیک قدرت به طور قابل توجهی بهبود یافته است [۳۳]. با این حال، به دلیل دشواری در هماهنگی و برنامه ریزی موثر منابع مختلف قابل کنترل، قابلیت کنترل عملیاتی^۱ را نمی‌توان به طور کامل به ظرفیت میزبانی سیستم ترجمه کرد.

در واقع، ذخیره ساز یک وسیله تبادل توان جدید برای جایگزینی سوئیچ مکانیکی در یک نقطه معمولاً باز در سیستم توزیع فعال، که می‌تواند به طور موثری عدم ظرفیت میزبانی در تنظیم توان سیستم توزیع فعال را جبران کند. با امکان اتصال انعطاف‌پذیر فیدرها، ذخیره ساز یک کنترل دقیق جریان فعال و راکتیو فراهم می‌کند تا تعادل منبع تغذیه و تقاضا را تسهیل کند. بر اساس ذخیره ساز، منابع مختلف انعطاف‌پذیر می‌توانند از جنبه‌های مکانی و زمانی هماهنگ شوند، که به طور موثر نفوذ تولید پراکنده سیستم‌های توزیع فعال را افزایش دهند. مزایای منابع انعطاف‌پذیر مبتنی بر ذخیره ساز باید برای دستیابی به ظرفیت میزبانی

عملیاتی در سیستم توزیع فعال تجزیه و تحلیل شود. با توجه به محدودیت‌های غیرخطی ناشی از محدودیت‌های جریان توان و محدودیت‌های عملیاتی منابع انعطاف‌پذیر مبتنی بر ذخیره ساز، مشکلات ارزیابی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع فعال به مسائل برنامه‌نویسی غیرخطی غیر محدب (NLP) تعلق دارند.

در مرجع [۳۴] با هدف دستیابی به وضعیت شبکه‌های توزیع با نفوذ زیاد انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی، شاخص‌های ظرفیت میزبانی را برای شبکه‌های توزیع ارائه می‌دهد و یک سطح دو مدل برنامه‌نویسی برای توزیع منابع تنظیم انعطاف‌پذیر در محدودیت‌های سیستم، ظرفیت میزبانی و تعادل ایجاد کرده است. یک الگوریتم بهینه‌سازی دو لایه برای تخصیص منعطف با تنظیم منبع پیشنهاد شده است که می‌تواند با کمترین سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی، ظرفیت جذب انرژی سیستم فتوولتائیک پشت بامی را افزایش دهد و تلفات سیستم را کاهش دهد. در [۳۵]، ابتدا تعریف و فرمول ریاضی مبتنی بر منطقه برای ظرفیت میزبانی عملیاتی برای سیستم توزیع ارائه شده است. سپس روش محاسبه کمی ظرفیت میزبانی عملیاتی برای ارائه ظرفیت میزبانی (FP) و قابلیت ظرفیت میزبانی (FA) ارائه شده است. کاربرد ظرفیت میزبانی عملیاتی از منظر عملکرد متنوع و بهبود ظرفیت میزبانی تحلیل می‌شود. در [۳۶]، یک چارچوب تحلیلی برای تعیین کمی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع فعال، از جمله تعیین کمی ظرفیت میزبانی گره، تطبیق ظرفیت میزبانی سیستم و ظرفیت میزبانی انتقال شبکه را فراهم می‌کند. از آنجا که عدم تعادل توان و انحراف ولتاژ حتی به دلیل سهم زیاد ادغام تولید پراکنده شدیدتر است، شاخص‌های ظرفیت میزبانی از ابعاد اندازه، فرکانس و شدت در عملکرد سیستم توزیع فعال خراب می‌شوند. از طریق تنظیم مکانی و زمانی جریان توان، دستگاه‌های مختلف قابل کنترل، مانند ذخیره ساز و سیستم ذخیره انرژی (ESS)، می‌توانند به طور موثر عدم تعادل توان و انحراف ولتاژ را کاهش دهند تا شاخص‌های ظرفیت میزبانی سیستم بهبود یابد. بنابراین، تحت چارچوب تحلیلی یکپارچه، از مزایای بالقوه کنترل‌پذیری سیستم به طور کامل استفاده می‌شود تا اقدامات متقابل موثری برای عملکرد انعطاف‌پذیر سیستم توزیع فعال فراهم شود.

در [۳۷]، یک استراتژی کنترل هماهنگ ذخیره ساز ارائه شده است، که در آن یک مدل دو سطحی ساخته شده است. شاخصی که احتمال ناامنی را توزیع می‌کند به عنوان پل ارتباطی بین دو لایه مدل دو سطح تعریف شده است. با حل مسئله برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط، هماهنگی بین سوئیچ و SNOP با توجه به ویژگی‌های مختلف دو نوع

دستگاه تحقق می‌یابد. در [۳۸]، ویژگی‌های چند بعدی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و حداکثر ظرفیت میزبانی تولید پراکنده به عنوان شاخص ارزیابی ظرفیت میزبانی آورده شده توسط ذخیره ساز استفاده می‌شود. مدل ارزیابی ظرفیت میزبانی بیشتر برای تعیین کمیت مزایای منابع انعطاف‌پذیر مبتنی بر ذخیره ساز، مانند ذخیره ساز معمولی، چند ترمیناله و با ذخیره انرژی ارائه شده است. سپس، مدل غیرخطی غیر محدب اصلی با استفاده از آرامش محدب به یک مدل برنامه‌نویسی مخروطی مرتبه دوم تبدیل شد و روش مبتنی بر برنامه‌نویسی محدب برای حل مدل پیشنهادی ایجاد شده است.

کارهای بسیاری در زمینه عملکرد و کاربرد ذخیره ساز در سیستم توزیع فعال متعادل و نامتعادل انجام شده است. طرح‌های زیادی در عملکرد بهینه به کار رفته است. اغلب این پژوهش‌ها با هدف مطالعه عملکرد ذخیره ساز، حداقل سازی تلفات توان سیستم، هزینه‌های سالانه و عملیاتی سیستم توزیع، انحراف ولتاژ، عدم تعادل ولتاژ، متعادل سازی بار (LBI) و ارتقای قابلیت اطمینان انجام شده است. از طرفی تشخیص خطا، حداکثرسازی بارهای بازبایی شده، افزایش ظرفیت نفوذ و میزبانی سیستم فتوولتاییک پشت بامی از جمله اهداف پیشرو به شمار می‌روند. اغلب روش‌های پیشنهادی فقط به صورت محدود بر روی سیستم توزیع ۳۳ گره استاندارد و شبکه‌های محلی مورد آزمایش قرار گرفتند. در برخی از مدل‌ها تلفات توان اکتیو ذخیره ساز در نظر گرفته نشده است، اگرچه در خود ذخیره ساز نیز افت توان اکتیو وجود دارد. از طرف دیگر، تأثیر تلفات فعال داخلی ذخیره ساز در بسیاری از کارهای تحقیقاتی ارائه شده است، اما تأثیر افت توان ذخیره ساز بر عملکرد سیستم، سهم آن در کل افت توان اکتیو و تأثیر افزایش تعداد ذخیره ساز متصل به سیستم در این آثار بررسی نشد. همچنین، می‌توان دریافت که بیشتر مطالعات مربوط به بازاریابی و ذخیره ساز، تعداد و محل ذخیره ساز را ثابت فرض می‌کنند که ممکن است منجر به عملکرد عملیاتی نامطلوب شود. علاوه بر این در نظر نگرفتن توان راکتیو از جمله موارد ضعف در تحقیقات به شمار می‌رود.

از طرفی با طرح شدن موضوع ظرفیت میزبانی به عنوان موضوعی جدید در سیستم توزیع، پژوهش‌های انجام شده در این حیطه به کمی‌سازی و سنجش ظرفیت میزبانی در حد ابتدایی پرداخته است. لزوم و اهمیت ارتقای ظرفیت میزبانی سیستم با ورود و نفوذ روز افزون تولید پراکنده در سیستم توزیع بیش از پیش آشکار شده است. ظرفیت میزبانی توانایی شبکه‌ها برای مقابله موثر با عدم قطعیت‌های مختلف ناشی از نفوذ زیاد تولیدات پراکنده و از بین بردن

اثرات منفی آنها است بنابراین، ظرفیت میزبانی به تدریج به یک مفهوم کلیدی در عملکرد سیستم توزیع فعال تبدیل شده است. با توجه به اینکه کمی سازی ظرفیت میزبانی دشوار است، معرفی شاخص لازم است. از نظر خصوصیات شاخص، ارتباطات بین شاخص های ارزیابی موجود و سطح نفوذ تولید پراکنده باید بیشتر روشن گردد. بنابراین، در ارزیابی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع باید ظرفیت میزبانی تولید پراکنده و نوسانات آن ها را در نظر گرفت. بر اساس ذخیره ساز، منابع مختلف انعطاف پذیر می توانند از جنبه های مکانی و زمانی هماهنگ شوند، که به طور موثر نفوذ تولید پراکنده سیستم های توزیع فعال را افزایش دهند. مزایای منابع انعطاف پذیر مبتنی بر ذخیره ساز باید برای دستیابی به ظرفیت میزبانی عملیاتی در سیستم توزیع فعال تجزیه و تحلیل شود. با توجه به محدودیت های غیرخطی ناشی از محدودیت های جریان توان و محدودیت های عملیاتی منابع انعطاف پذیر مبتنی بر ذخیره ساز، مسائل ارزیابی ظرفیت میزبانی سیستم توزیع فعال به مسائل برنامه نویسی غیرخطی تعلق دارند. مکان ذخیره ساز بسیار در عملکرد و بهبود سیستم اهمیت دارد. چندین سناریو برای بررسی عملکرد روش، تلفات اکتیو و راکتیو و همچنین تأثیر افزایش تعداد ذخیره ساز های متصل بررسی شده است. روش پیشنهادی جهت نشان دادن کارایی عملکرد بر سیستم ۳۳ گره استاندارد پیاده سازی شده است. موارد مطرح شده در ارتباط با مرور مطالعات و تحقیقات، در جدول ۱-۲ نشان داده است.

جدول ۱-۲: مرور مطالعات ذخیره ساز

مرجع	سال	هدف و مشخصات طرح پیشنهادی	روش حل	شبکه تست
[۶]	۲۰۱۶	اصول عملکرد ذخیره ساز تحت شرایط عملیاتی شبکه	x	سیستم MV
[۲۳]	۲۰۱۸	کاربرد ذخیره ساز در شناسایی، ایزوله و تجدید قسمت خطا	x	x
[۱۵]	۲۰۱۶	بهبود پروفیل ولتاژ	GA	۳۳ گره
[۱۹]	۲۰۱۷	تعیین نقاط تنظیم بهینه ذخیره ساز، کاهش تلفات، تعادل بار فیدر و بهبود مشخصات ولتاژ	MOCPLX	۶۹ گره
[۲۴]	۲۰۱۶	بهبود ظرفیت میزبانی شبکه برای استفاده از منابع تولید پراکنده	x	x
[۱۶]	۲۰۲۰	کنترل ولتاژ غیرمتمرکز در ذخیره ساز بر اساس حساسیت ولتاژ	ADMM	۳۳ گره

۶۹ گره	MBGWO	طرح هماهنگ متشکل از OLTC و CBS کنترل ولتاژ با حداقل هزینه‌های عملیاتی	۲۰۱۹	[۱۷]
۶۹ گره	MISOCP	کاهش ولتاژ و محدودیت‌های حرارتی در شبکه‌های ولتاژ متوسط با نفوذ زیاد تولید پراکنده	۲۰۱۹	[۲۲]
۳۳ گره	GA	جایابی ذخیره ساز در شبکه توزیع متعادل به منظور کاهش تلفات اکتیو، متعادل کردن بار و بهبود پروفیل ولتاژ	۲۰۱۸	[۲۵]
۳۳ گره	IPOP-CMA-ES	موقعیت مکانی بهینه واحدهای تولید پراکنده با ذخیره ساز کاهش توان، انحراف ولتاژ و شاخص تعادل بار	۲۰۲۰	[۲۶]
۳۳ گره	DE	مدل تصادفی مبتنی بر مکان‌یابی ذخیره ساز برای بهبود عدم تعادل شبکه توزیع با عدم قطعیت سیستم فتوولتاییک پشت بامی	۲۰۱۸	[۲۷]
۳۳ گره	DC HSS	اختصاص ذخیره ساز و واحدهای تولید پراکنده همزمان و بدون بازاریابی شبکه	۲۰۱۹	[۲۸]
۳۳ گره	دو لایه	ارائه شاخص‌های ظرفیت میزبانی شبکه با نفوذ زیاد سیستم فتوولتاییک پشت بامی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش تلفات	۲۰۱۸	[۳۴]
۳۳ گره	×	تعریف ظرفیت میزبانی عملیاتی سیستم توزیع روش محاسبه کمی برای ارائه و قابلیت ظرفیت میزبانی	۲۰۲۰	[۳۵]
۳۳ گره	k-means clustering	چارچوب تحلیلی تعیین کمیّت ظرفیت میزبانی سیستم توزیع فعال با بهبود عدم تعادل توان و انحراف ولتاژ	۲۰۱۹	[۳۶]
۳۹ گره	CLCplex	بهبود ظرفیت میزبانی تولید پراکنده	۲۰۱۹	[۳۷]
۳۳ گره	SOCP, DCP	تجزیه و تحلیل ویژگی‌های چند بعدی ظرفیت میزبانی سیستم با حداکثر ظرفیت میزبانی تولید پراکنده به عنوان شاخص ارزیابی ظرفیت میزبانی	۲۰۱۸	[۳۸]
۳۳ گره	CPLEX	ظرفیت میزبانی سیستم توزیع با حداکثر به عنوان شاخص ارزیابی ظرفیت میزبانی	۲۰۲۱	[پیشنهادی]

فصل سوم- روش و بیان مسئله

مقدمه

در این فصل مفاهیم ریاضی بکار رفته در مسئله ارائه می‌شود. ابتدا مدل ذخیره ساز برای تحلیل پایدار سیستم تهیه شده است، که با بیان معادلات حاکم بر ذخیره ساز و تلفات توان، مدل سازی با استفاده از ساختار B2BVSC انجام می‌گیرد. بدین ترتیب ادغام ذخیره ساز در سیستم توزیع امکان پذیر خواهد شد. سپس انواع مدل سازی تولیدات پراکنده و بار به عنوان اجزای مسئله تشریح شده است. در ادامه پخش بار پسر و پیشرو همراه با الگوریتم‌های مربوطه جهت حل مسئله پخش بار در سیستم توزیع در نظر گرفته شده است. سپس به مفهوم گسترده ظرفیت میزبانی پرداخته شده است. بدین ترتیب که ابتدا با تعریف ظرفیت میزبانی و بررسی مفهومی آن چارچوبی برای تعبیه ظرفیت میزبانی در مسئله ترسیم شده است. سپس مدل سازی ظرفیت میزبانی به صورت کمی انجام شده است. جهت ارزیابی ظرفیت میزبانی طبق مطالعات انجام شده به یک شاخص مناسب نیاز است. بر اساس مدل با تعریف شاخص جهت ارزیابی ظرفیت میزبانی در سیستم توزیع، یک روش برای به دست آوردن مکان بهینه ذخیره ساز با هدف بهبود ظرفیت میزبانی توسعه داده شده است.

برای این منظور تعریف و فرمول بندی مسئله بهینه سازی آورده شده است. پس از آن تشریح الگوریتم مورد استفاده برای حل مسئله بهینه سازی ارائه می‌شود. در این روش پس از مدل سازی ذخیره ساز و پخش بار ابتدا تمامی کلیدهای شبکه بسته در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به تعداد حلقه‌های موجود در شبکه بایستی تعدادی از کلیدها را باز کرد تا شبکه ساختار شعاعی خود را حفظ کند. لذا در هر بار تعدادی از کلیدهای شبکه باز می‌شود و ضمن حفظ قیود شعاعی بودن شبکه و تغذیه همه بارها، تابع هدف محاسبه شده و سرانجام با تکرار الگوریتم ساختار شبکه به دست خواهد آمد. بدین منظور در این کار از الگوریتم CPLEX و

نظریه ظرفیت میزبانی برای انجام روش استفاده می‌شود. در این روش ابتدا کلیدهایی که قرار است باز شوند توسط الگوریتم مشخص می‌شوند؛ سپس در ساختار به دست آمده در صورت شعاعی بودن شبکه و ایزوله نشدن هیچ کدام از بارها، پخش بار اجرا شده و مقدار تابع هدف محاسبه خواهد شد و در غیر اینصورت تابع هدف جریمه می‌شود. در ادامه ابتدا به مقدمات سیستم توزیع می‌پردازیم.

سیستم توزیع آخرین مرحله در تحویل نیروی الکتریکی است که برق را از سیستم انتقال به مصرف‌کنندگان منفرد منتقل می‌کند. خطوط توزیع اولیه، ولتاژ متوسط را به ترانس‌های توزیعی منتقل می‌کنند که در نزدیکی محل مصرف‌کننده قرار دارد. ترانس‌های توزیع دوباره ولتاژ را به ولتاژ قابل استفاده از لوازم خانگی کاهش می‌دهند و معمولاً چندین مصرف‌کننده را از طریق خطوط توزیع ثانویه در این ولتاژ تغذیه می‌کنند. تأمین برق مصرف‌کنندگان به میزان مورد نظر آنها ضروری است. بنابراین از جمله الزامات یک شبکه توزیع موثر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۸]:

- در دسترس بودن تقاضای برق: مهمترین نیاز شبکه توزیع است و با توجه به آن توان کافی باید در دسترس مصرف‌کنندگان باشد.
- قابلیت اطمینان: قابلیت اطمینان به این معنی است که اگر قطعی برق وجود داشته باشد، باید برای حداقل زمان ممکن باشد.
- ولتاژ: نیاز بسیار مهم در سیستم توزیع به شمار می‌رود. به طور کلی ولتاژ به دلیل تغییر در میزان بار متفاوت است.
- ظرفیت میزبانی: از جمله موارد نوظهور در سیستم توزیع به شمار می‌رود. ظرفیت میزبانی عملیاتی توانایی شبکه برای مقابله موثر با عدم قطعیت‌های مختلف ناشی از نفوذ زیاد تولیدات پراکنده و از بین بردن اثرات منفی آنها است. بنابراین، ظرفیت میزبانی به تدریج به کلید عملکرد در شبکه توزیع تبدیل شده است [۵].

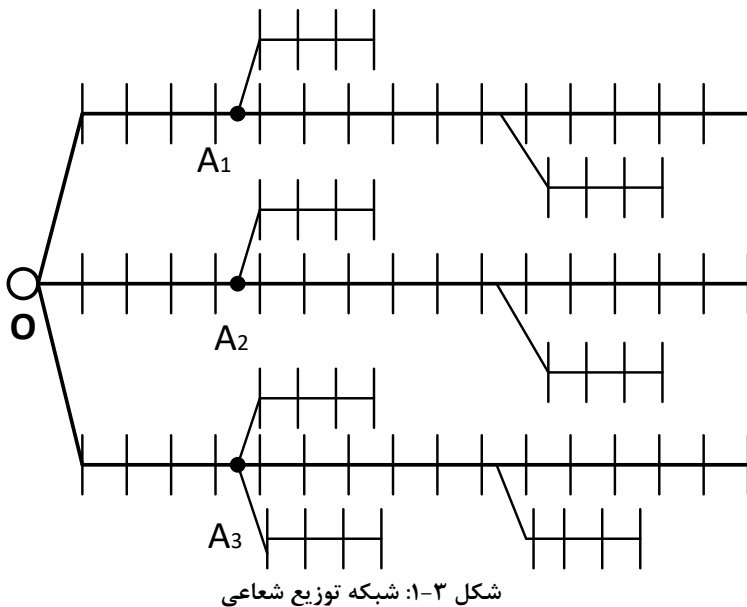
بر اساس نوع جریان، یک شبکه توزیع را می‌توان به شبکه AC و DC دسته‌بندی کرد. بر اساس ماهیت ساخت و ساز، یک شبکه توزیع به شبکه هوایی^۱ و شبکه زیرزمینی^۲ دسته‌بندی می‌شود؛ اما بر اساس طرح عملکرد، شبکه توزیع به موارد زیر تقسیم‌بندی می‌شود:

- سیستم توزیع شعاعی^۳
- سیستم توزیع مشبک^۴

معمولاً سیستم مشبک نسبت به سیستم شعاعی گران‌تر است زیرا برای ساخت سیستم مشبک به کلیدها و هادی‌های بیشتری نیاز است. مزیت اصلی شبکه شعاعی ساخت ساده و هزینه اولیه کم است. در ولتاژ پایین، شبکه شعاعی بسیار مفید است. همچنین شبکه شعاعی هنگامی ترجیح داده می‌شود که پست در مرکز بار قرار گرفته باشد.

در سیستم شعاعی فیدرهای جداگانه از یک پست فرعی منشعب می‌شوند و توزیع کنندگان را فقط در یک انتهای آن تغذیه می‌کنند. توزیع شعاعی نوعی توزیع توان است که در آن توان از شاخه اصلی به زیر شاخه‌ها منتقل شده و سپس دوباره از شاخه‌های فرعی جدا می‌شود. همانطور که مطابق شکل (۳-۱) مشاهده می‌شود، توان از گره ریشه O منتقل می‌شود و سپس تقسیم در A1، A2 و A3 انجام می‌شود. ساختار شعاعی نشان می‌دهد که هیچ حلقه‌ای در شبکه وجود ندارد و هر باس دقیقاً از طریق یک مسیر به منبع متصل است. این ارزانترین اما کم اطمینان‌ترین پیکربندی شبکه است. سیستم توزیع شعاعی به طور گسترده در مناطق کم جمعیت استفاده می‌شود. یک شبکه شعاعی از پست خارج می‌شود و از منطقه شبکه عبور می‌کند و هیچ اتصال عادی به منبع دیگر ندارد. این نوع شبکه تحویل شعاعی^۵ در خطوط طولانی با مناطق بار جداگانه معمول است؛ هر گره حداقل از طریق یک مسیر به پست متصل می‌شود.

1. Overhead Network
 2. Underground Network
 3. Radial Distribution System
 4. Ring Main Distribution System
 1. Radial Delivery



معیار شماره‌گذاری گره و خط بدین ترتیب است که گره‌ها به ترتیب صعودی و از لایه‌ای به لایه دیگر شماره‌گذاری می‌شوند، به این ترتیب که هر مسیری از گره ریشه به گره انتهایی با گره‌های شماره مرتب صعودی روبرو می‌شود. هر شاخه از گره ارسال کننده (در سمت ریشه) شروع می‌شود و با تعداد باس پایان‌دهنده (منحصر به فرد) آن مشخص می‌شود.

مدل‌سازی ذخیره ساز

ذخیره ساز برای اولین بار در سال ۲۰۱۱ [۹] برای ایجاد ظرفیت میزبانی بین فیدرهای توزیع ارائه شد. آنها می‌توانند با استفاده از سه ساختار، شامل مبدل منبع ولتاژ پشت به پشت (BTBVSC)، جبران کننده سنکرون سری استاتیک (SSSC) و کنترل کننده جریان یکپارچه (UPFC) و مبدل منبع ولتاژ چند ترمیناله (MTVSC) در شبکه‌های توزیع قرار گیرند. از یک BTBVSC به عنوان ساختار یکپارچه‌سازی برای ذخیره سازهای متصل به سیستم مورد مطالعه استفاده شده، زیرا قابلیت ظرفیت میزبانی و توانایی دینامیکی مناسبی در افزایش کیفیت توان دارد.

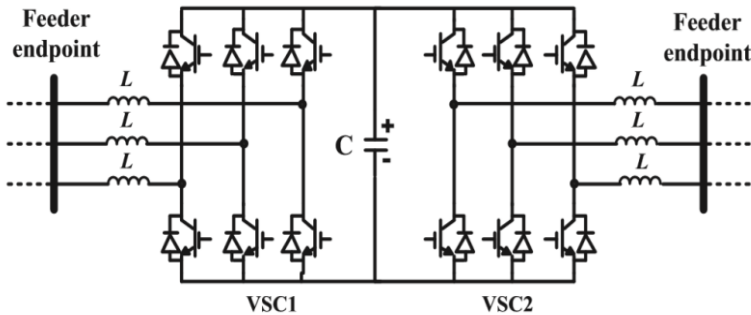
مبدل‌های BTB از جمله ساختارهای پرکاربرد به شمار می‌روند و به عنوان مبدل‌های AC-AC دوطرفه ولتاژ پایین در کاربردهای صنعتی و سیستم‌های قدرت، مانند کنترل ماشین‌های الکتریکی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های جریان مستقیم با ولتاژ بالا

نیز در شبکه‌های انتقال برای بهبود کیفیت توان کاربرد دارند. یکی از ویژگی‌های برجسته مبدل BTB، قابلیت کنترل سریع پخش بار و ایجاد تعادل توان در دو سمت مبدل از طریق خازن اتصال DC است. در مقایسه با بازآرایی شبکه با کلید معمولی، استفاده از ذخیره ساز بر مبنای VSC-BTB دارای برتری‌های زیر است [۶]:

- بهره‌برداری انعطاف‌پذیر شبکه و تنظیم پخش بار به طور پیوسته
- بهبود کیفیت توان
- اتصال فیدرهای متفاوت
- ایزوله کردن اغتشاشات و خطاها
- کنترل توان انعطاف‌پذیر اکتیو و راکتیو
- کنترل ولتاژ سریع و مستقل

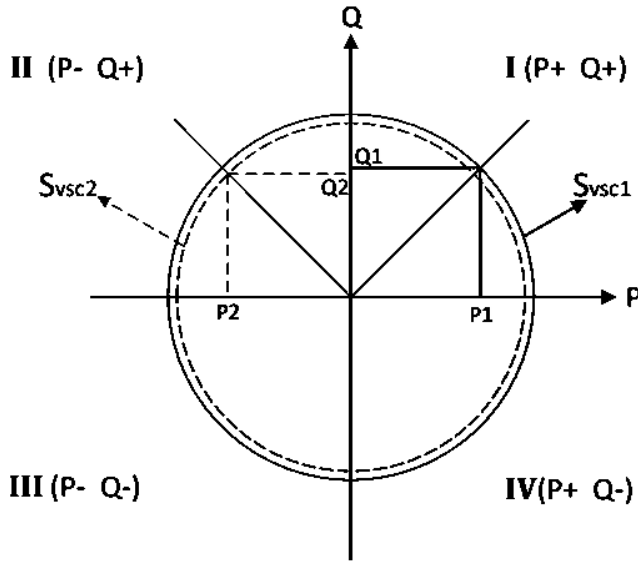
توپولوژی مدار اصلی VSCBTB در شکل (۳-۲) نشان داده شده است که شامل یک خازن DC برای ایجاد بافر انرژی و کاهش ریپل ولتاژ DC است. دو VSC بین نقاط پایانی فیدر قرار دارند و از طریق یک لینک DC مشترک متصل می‌شوند. هر ترمینال VSC به یک فیلتر سری متصل است که القاء آن با نشان داده شده است. این اندوکتانس تضعیف هارمونیک فرکانس بالا را فراهم کرده، نرخ جریان اتصال کوتاه را محدود کرده و کنترل توان را تسهیل می‌کند. از مقاومت خط و راکتانس بین فیلتر و نقطه پایانی فیدر صرف نظر می‌شود زیرا خط بین فیلتر و نقطه پایانی فیدر کوتاه است [۶].

با طراحی بهینه کنترل‌کننده و ساختار مبدل، می‌توان از این مبدل در چهار ناحیه مختلف مطابق شکل (۳-۳) بهره‌برداری کرد. توان راکتیو ذخیره‌ساز در هر دو سمت مبدل، بر اساس نیاز شبکه به شبکه تزریق می‌شود و همچنین ذخیره‌ساز قادر است تبادل توان اکتیو بین دو فیدر را به صورت سریع و دقیق کنترل نماید. برای ارزیابی توانایی ذخیره‌ساز در بهبود وضعیت شبکه، یک مدل ساده تزریق توان ارائه شده است که جزئیات ساختار و کنترل مبدل را لحاظ نمی‌کند [۲۵].



شکل ۳-۲: توپولوژی مدار اصلی ذخیره ساز مبتنی بر BTBVSC [۶]

دو محور در شکل (۳-۳) مربوط به توان اکتیو و راکتیو است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده توان تأمین‌کننده VSC و مقادیر منفی نمایانگر توان جذب‌کننده VSC هستند. دایره‌ها اندازه (حداکثر توان ظاهری، S_{1max} ، S_{2max}) VSC مربوطه را نشان می‌دهند. توان تأمین شده توسط VSC نمی‌تواند از مقدار نامی آنها فراتر رود. اگرچه در خود ذخیره ساز تلفات توان فعال مشخصی وجود دارد، هنگامی که برای کل سیستم توزیع به ویژه برای سیستم توزیع در مقیاس بزرگ بهینه شود، افت توان اکتیو یک یا تعداد کمی از دستگاه‌ها نسبتاً کم است. توان اکتیو دو مبدل را می‌توان برابر دانست؛ توان‌های راکتیو تأمین شده یا جذب شده توسط دو ترمینال، یعنی Q_{S1} و Q_{S2} ، مستقل هستند. در حالی که توان‌های اکتیو یعنی P_{S1} و P_{S2} ، متغیر مستقلی نیستند.



شکل ۳-۳: نواحی بهره برداری ذخیره ساز [۲۵]

شکل (۳-۴) تصویری از ادغام ذخیره ساز در یک سیستم توزیع را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی یک‌ذخیره ساز، معادلات اصلی برای جریان توان در شبکه مورد مطالعه به شرح زیر بیان می‌شود [۱۵]:

$$P_{i+1} = P_i - P_{i+1}^L - r_{i,i+1} \cdot \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (۱-۳)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_{i+1}^L - x_{i,i+1} \cdot \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (۲-۳)$$

$$|V_{i+1}|^2 = |V_i|^2 - 2(r_{i,i+1}P_i + x_{i,i+1}Q_i) + (r_{i,i+1}^2 + x_{i,i+1}^2) \cdot \frac{(P_i^2 + Q_i^2)}{|V_i|^2} \quad (۳-۳)$$

که در این معادلات P_i و Q_i توان اکتیو و راکتیو تزریق شده در گره i ام هستند، P_{i+1}^L و Q_{i+1}^L توان‌های اکتیو و راکتیو بارهای متصل شده روی گره $i+1$ ، $|V_i|$ مقدار ولتاژ گره i ام و $r_{i,i+1}$ و $x_{i,i+1}$ مقاومت فیدر و راکتانس بین گره‌های i و $i+1$ هستند.

همانطور که در شکل (۳-۴) نشان داده شده، ذخیره ساز با استفاده از توان‌های اکتیو و راکتیو که در ترمینال‌های خود تزریق شده، ادغام می‌شوند، طبق معادله (۳-۴) جمع توان تزریق شده در ترمینال‌های ذخیره ساز و افت توان داخلی مبدل‌های آن باید برابر صفر باشد.

محدودیت‌های توان راکتیو در معادله (۳-۵) و حد ظرفیت ذخیره ساز در معادله (۶-۳) آورده شده است. بدین ترتیب [۱۵]:

$$P_I^{SOP} + P_J^{SOP} + P_I^{SOP-LOSS} + P_J^{SOP-LOSS} = 0 \quad (۴-۳)$$

$$Q_I^{SOP-\min} \leq Q_I^{SOP} \leq Q_I^{SOP-\max} \quad (۵-۳)$$

$$\sqrt{(P_I^{SOP})^2 + (Q_I^{SOP})^2} \leq S_I^{SOP}, \forall I \in N_f \quad (۶-۳)$$

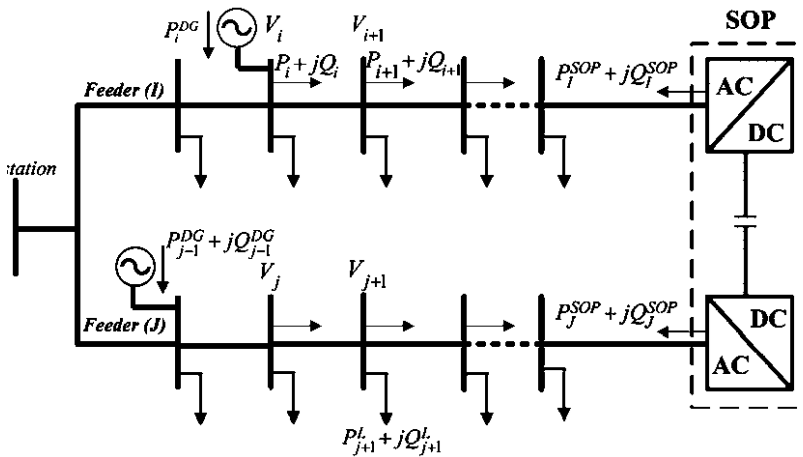
جایی که N_f تعداد فیدرها است، $CPLEX^P_I$ و $CPLEX^P_J$ توان اکتیو ذخیره ساز تزریق شده به فیدر I و J ام است. $CPLEX^{P-loss}_{I,J}$ تلفات توان اکتیو مبدل متصل به فیدر I و J است. Q ذخیره ساز I, J توان راکتیو ذخیره ساز تزریق شده به فیدر I و J است. Q ذخیره ساز I, J حداقل و حداکثر توان راکتیو ذخیره ساز تزریق شده به فیدر I و J است. S ذخیره ساز I حداکثر ظرفیت ذخیره ساز برنامه‌ریزی شده است.

بعلاوه، تلفات اکتیو هر مبدل $(CPLEX^{P-loss}_{I,J})$ و کل تلفات توان اکتیو ذخیره ساز $(CPLEX^{P-loss})$ در معادله (۷-۳) و (۸-۳) به شرح زیر فرموله شده است [۲۸]:

$$P^{SOP-LOSS} = \sum_{I=1}^{N_f} P_I^{SOP-LOSS} \quad (۳-۷)$$

$$P_I^{SOP-LOSS} = A_{LOSS}^{SOP} \sqrt{(P_I^{SOP})^2 + (Q_I^{SOP})^2}, \forall I \in N_f \quad (۳-۸)$$

که در آن A ذخیره ساز $LOSS$ ضریب تلفات VSC است که نشان دهنده نشتی در توان منتقل شده به کل توان انتقال یافته بین فیدرها است. لازم به ذکر است که کلیه معادلات برای فیدر i و j صادق نیز است.



شکل ۳-۴: ادغام ذخیره ساز در یک سیستم توزیع [۲۸]

از نظر ریاضی، برای نشان دادن متغیرهای ذخیره ساز، ابتدا می توان یک ذخیره ساز بدون تلفات را در نظر گرفت. از این رو، یک ذخیره ساز می تواند توسط توان های اکتیو و راکتیو تزریقی $CPLEX^P_I$ ، ذخیره ساز Q ، ذخیره ساز Q نشان داده شود، جایی که $CPLEX^P_J = -CPLEX^P_I$ باشد.

از طرفی، می توان ذخیره ساز را با تلفات آن در نظر گرفت. بنابراین، با شروع از معادله (۳-۴)، می توانیم $CPLEX^{P-loss}_I$ را به صورت زیر بدست آوریم:

$$P_J^{SOP} = -P_I^{SOP-LOSS} - P_J^{SOP-LOSS} - P_I^{SOP} \quad (3-9)$$

سپس با جایگزینی (۳-۸) در (۳-۹):

$$P_J^{SOP} = -A_{LOSS}^{SOP} \sqrt{(P_I^{SOP})^2 + (Q_I^{SOP})^2} - A_{LOSS}^{SOP} \sqrt{(P_J^{SOP})^2 + (Q_J^{SOP})^2} - P_I^{SOP} \quad (3-10)$$

بر این اساس اگر $CPLEX^P_I$ ، ذخیره ساز Q و Q ذخیره ساز را به عنوان متغیرهای تصمیم گیری ذخیره ساز تعیین کنیم، (۳-۱۰) یک معادله غیرخطی با یک $CPLEX^P_J$ نامشخص خواهد بود. بنابراین، می توان با استفاده از روش های تجزیه و تحلیل عددی به طور مستقل $CPLEX^P_J$ را بدست آورد. بنابراین، با فرض اینکه تلفات ذخیره ساز شناخته شده باشد، یک ذخیره ساز

را می‌توان با توان اکتیو و راکتیو تزریقی $CPLEX^P$ ، ذخیره ساز، ذخیره ساز به عنوان پروفایل ذخیره ساز بدون تلفات نشان داد.

مدل‌سازی تولیدات پراکنده

واحدهای تولید توان الکتریکی که نزدیک بار قرار دارند و مستقیماً به شبکه‌های توزیع متصل می‌شوند، به عنوان تولیدات پراکنده^۱ تعریف می‌شود. در سیستم توزیع شامل سیستم خورشیدی پشت بامی، سیستم فتوولتائیک، سلول سوختی، میکروتوربین و برخی از واحدهای توربین بادی از طریق رابط الکترونیکی قدرت به شبکه برق وصل می‌شوند. در چنین مواردی، مدل واحد سیستم خورشیدی پشت بامی در پخش بار به روش کنترلی بستگی دارد که در مدار کنترل مبدل استفاده می‌شود. سیستم خورشیدی پشت بامی‌هایی که با تنظیم ولتاژ تحریک سنکرون یا مدار کنترل مبدل مورد استفاده برای کنترل مستقل توان اکتیو ولتاژ را کنترل می‌کنند، به عنوان نوع PV مدل می‌شوند. سایر سیستم خورشیدی پشت بامی‌ها مانند واحدهای مبتنی بر ژنراتور القایی یا مبدل مورد استفاده برای کنترل مستقل P و Q، به شکل نوع PQ مدل‌سازی می‌شود. توسط این مدل‌ها، روش پخش بار مبتنی بر تزریق توان برای مطالعات سیستم توزیع استفاده می‌شود [۳۹].

طبقه‌بندی سیستم خورشیدی پشت بامی به طور عمده از چهار نوع بر اساس توانایی تحویل توان اکتیو و راکتیو آنها به شرح زیر است [۴۰]:

- نوع اول: در ضریب توان واحد فقط توان اکتیو را تحویل می‌دهد. به عنوان مثال می‌توان به فتوولتائیک، میکروتوربین و سلول سوختی و غیره اشاره کرد.
- نوع دوم: توان راکتیو را در ضریب توان صفر ارائه می‌دهد.
- نوع سوم: توان اکتیو را تحویل می‌دهد اما توان راکتیو را مصرف می‌کند یا جذب می‌کند (Q منفی است). ضریب توان در دامنه بین ۰ تا ۱ است. به عنوان مثال، ژنراتور القایی (مزرعه بادی).
- نوع چهارم: هر دو توان اکتیو و راکتیو را در ضریب توان بین ۰ تا ۱ ارائه می‌دهد. به عنوان مثال می‌توان به ژنراتورهای سنکرون یا ماشین سنکرون (تولید همزمان^۲، توربین گاز و ...) اشاره کرد.

1. Distributed Generation (DG)
1. Cogeneration

اگر بتوان با تغییر میزان مصرف سوخت به طور خودکار توان خروجی را کنترل کرد، واحدهای سیستم خورشیدی پشت بامی قابل دیسپاچ مانند نیروگاه‌های برق آبی کوچک و توربین‌های گازی مبتنی بر زیست توده در نظر گرفته می‌شوند؛ در غیر این صورت واحدهای سیستم خورشیدی پشت بامی به عنوان غیرقابل دیسپاچ مانند خورشیدی و تولید باد در نظر گرفته می‌شوند (که کاملاً به شرایط آب و هوایی بستگی دارد) [۳۹].

مدل سازی سیستم خورشیدی پشت بامی به عنوان گره PQ

یک واحد سیستم خورشیدی پشت بامی را می‌توان به سه روش مختلف در حالت گره PQ مدل سازی کرد که در ادامه نشان داده شده است [۴۰]:

مدل بار منفی

در این حالت سیستم خورشیدی پشت بامی به سادگی به عنوان یک منبع تولید ثابت اکتیو و راکتیو مدل سازی می‌شود. مقادیر مشخص شده این مدل توان خروجی اکتیو و راکتیو سیستم خورشیدی پشت بامی است. سیستم خورشیدی پشت بامی نوع سلول سوختی را می‌توان به عنوان مدل بار منفی PQ مدل سازی کرد. بدین ترتیب بار در باس i ام با واحد سیستم خورشیدی پشت بامی مطابق معادلات (۳-۱۱) و (۳-۱۲) اصلاح می‌شود:

$$P_{load,i} = P_{load,i} - P_{DG,i} \quad (3-11)$$

$$Q_{load,i} = Q_{load,i} - Q_{DG,i} \quad (3-12)$$

مدل ضریب توان ثابت

سیستم خورشیدی پشت بامی های قابل کنترل مانند سیستم خورشیدی پشت بامی مبتنی بر واحدهای مبتنی بر الکترونیک قدرت ترجیحاً به عنوان مدل ضریب توان ثابت مدل سازی می‌شوند. به عنوان مثال، توان خروجی را می‌توان با کنترل زاویه تحریک برای سیستم خورشیدی پشت بامی های مبتنی بر الکترونیک قدرت تنظیم کرد [۱۶]. برای این مدل، مقادیر مشخص شده توان اکتیو و ضریب قدرت سیستم خورشیدی پشت بامی هستند.

مدل توان راکتیو متغیر

سیستم خورشیدی پشت بامی هایی که از ژنراتورهای القایی به عنوان دستگاه‌های تبدیل توان استفاده می‌کنند اغلب مانند ژنراتورهای راکتیو متغیر عمل می‌کنند. با استفاده از توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی، می‌توان خروجی توان اکتیو را با منحنی توان توربین باد محاسبه

کرد. سپس، خروجی توان راکتیو آن می‌تواند به صورت تابعی متشکل از خروجی توان اکتیو، ولتاژ باس و امپدانس ژنراتور فرموله شود. با این حال، محاسبه توان راکتیو با استفاده از این روش دشوار است. توان راکتیو مصرف شده توسط بار را نمی‌توان به طور کامل توسط سیستم توزیع تأمین کرد، بنابراین بانک‌های خازنی برای اصلاح ضریب توان در جایی که از سیستم خورشیدی پشت بامیمنتی بر مولد القایی استفاده می‌شود، نصب می‌شوند.

مدل‌سازی سیستم خورشیدی پشت بامی به عنوان نوع PV

سیستم خورشیدی پشت بامی مدل شده به عنوان گره PV معمولاً مدل ولتاژ ثابت است. مقادیر مشخص شده این مدل توان خروجی اکتیو سیستم خورشیدی پشت بامی و مقدار ولتاژ باس است. برای حفظ ولتاژ ثابت، تغییرات ولتاژ باید با تزریق توان راکتیو مورد نیاز، صفر را حفظ کند.

مدل خورشیدی

سیستم‌های فتوولتائیک قادرند انرژی تابشی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. خروجی این سیستم‌ها به صورت جریان مستقیم (DC) است و از طریق اینورتر به جریان متناوب (AC) تبدیل می‌شود تا با شبکه برق متناوب سازگاری داشته باشد. توان تولیدی یک پنل فتوولتائیک به سطح (A) صفحه، تابش خورشیدی $\mu(t)$ و بازدهی صفحه (β) مطابق معادله (۳-۱۳) بدست می‌آید. [۳۹]:

$$P_{PV}(t) = A\beta\mu(t) \quad (3-13)$$

با استفاده از (۳-۱۴) و (۳-۱۵)، توان خروجی فتوولتائیک در حالت‌های مختلف محاسبه می‌شود.

$$T_c = T_a + \frac{NOT - 20}{0.8} \times G \quad (3-14)$$

$$P_{pv}^{st} = P_{STG} + \frac{G_{ING}}{G_{STG}} \times (1 + k(T_c - T_{c,ref})) \quad (3-15)$$

T_c و T_a دمای سلول و محیط، NOT درجه حرارت نامی سلول، G تابش جهانی خورشید، P_{STG}^{rated} توان PV در شرایط آزمایش استاندارد، G_{STG} و G_{ING} تابش خورشیدی در شرایط استاندارد و مورد مطالعه و k ضریب دما است.

توان تولیدی و خروجی توربین بادی متناسب با انرژی جنبشی، تراکم هوا، سرعت باد و پارامترهای منحنی عملکرد است. سایر پارامترهای توربین بادی شامل سرعت باد برش^۱، سرعت باد قطع شده^۲ و سرعت باد نامی^۳ هستند. مقادیر دقیق را می توان از داده تولیدکننده مربوطه بدست آورد [۳۹].

$$P_{wind}(t) = 0.5\alpha\rho(t)Av(t)^3 \quad (۳-۱۶)$$

که α ثابت آلبرت بتز است، $\rho(t)$ چگالی هوا است، A ناحیه ای است که توسط روتور توربین جارو می شود و $v(t)$ سرعت باد است.

$$P_{WT}^{s,t}(v) = \begin{cases} P_{WT}^{rated} ; v_{rat} \leq v \leq v_{cout} \\ P_{WT}^{rated} \times \frac{v - v_{cin}}{v_{rat} - v_{cin}} ; v_{cin} \leq v \leq v_{rat} \\ 0 ; v_{cout} \leq v \text{ or } v \leq v_{cin} \end{cases} \quad (۳-۱۷)$$

P_{WT}^{rated} توان نامی و v سرعت باد در مزرعه و v_{cin} سرعت برش و v_{cout} سرعت قطع و v_{rat} سرعت نامی است. منابع مختلف انرژی هنگام ترکیب با مبدل های مختلف، ویژگی های خروجی خاصی را نشان می دهند. به عنوان مثال، هنگامی که از آن برای تبدیل انرژی باد به شبکه های برق استفاده می شود، ژنراتور القایی مانند یک مولد ثابت واقعی و توان راکتیو متغیر عمل خواهد کرد. بنابراین به عنوان یک مدل توان راکتیو متغیر در تجزیه و تحلیل پخش بار مدل سازی می شود. با این حال، اگر از مبدل الکترونیکی ساکن برای تبدیل توان خورشیدی استفاده شود، بیشتر مانند یک ژنراتور با ضریب توان ثابت در شرایط کار نرمال عمل می کند. بنابراین، آن را به عنوان مدل ضریب توان ثابت مدل می کنند. حداکثر درجه قدرت ایستگاه فتوولتائیک خورشیدی با در نظر گرفتن میانگین کل توان های خورشیدی محاسبه شده با استفاده از معادله (۳-۱۳) محاسبه می شود. به همین ترتیب، حداکثر درجه توان ایستگاه بادی با در نظر گرفتن میانگین کل توان های محاسبه شده با استفاده از معادله (۳-۱۶) بدست می آید.

از آنجا که این تحقیق در حیطه دینامیکی و حالات گذرا نیست و احتیاج به مدل ماشین و معادلات دیفرانسیل ندارد، بنابراین مدل سازی سیستم خورشیدی پشت بامی همانطور که در بخش ۳-۲ نشان داده شده است به عنوان بار منفی به شبکه اضافه می شود، ولتاژ سیستم

-
1. Cut in Wind Speed
 2. Cut out Wind Speed
 3. Rated Wind Speed

هرچه باشد، این بار توان را به سیستم منتقل می‌کند. همچنین با در نظر گرفتن سناریو مختلف که در فصل بعد توضیح داده می‌شود می‌توان چندین سطح تولید در نظر گرفت.

مدل‌سازی بار

نمایش ریاضی نحوه وابستگی توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بارهای الکتریکی به تغییرات ولتاژ را اصطلاحاً مدل‌سازی بار می‌گویند؛ که می‌تواند برای بارهای مختلف با توجه به ماهیت و نحوه عملکرد آنها انجام پذیرد. مدل‌های بار ویژگی‌های بار را در یک لحظه خاص به عنوان توابع مقدار ولتاژ و فرکانس بیان می‌کنند. این مدل را می‌توان به چند گروه ثابت، نمایی و چند جمله‌ای تقسیم کرد. برای انجام مدل‌سازی بارهای مختلف نیاز به شناخت ماهیت انواع بارها و استفاده از مدل علمی مناسب می‌باشد. در این قسمت به معرفی رایجترین مدل‌های بار پرداخته شده است [۴۱].

مدل توان ثابت

این مدل به صورت MW و یا MVAR ثابت نیز تعریف می‌شود؛ هر چند که توان‌های اکتیو و راکتیو هر کدام رفتار جداگانه‌ای دارند. بارهای توان ثابت جریان بیشتری را از سیستم تحت شرایط افت ولتاژ و جریان کمتری را تحت شرایط اضافه ولتاژ می‌کشند.

مدل جریان ثابت

این نوع بارها جریان ثابتی را از سیستم تحت هر شرایط ولتاژی می‌کشد. توان مصرف شده به وسیله یک بار جریان ثابت با ولتاژ منبع تغذیه نسبت مستقیم دارد. بنابراین یک بار جریان ثابت توان بیشتری را در شرایط ولتاژ بالا مصرف می‌کند و بالعکس توان کمتری را در شرایط ولتاژ پایین مصرف می‌کند.

مدل امپدانس ثابت

این نوع از بارها ترکیبی از عناصر استاتیکی همچون مقاومت، سلف و خازن می‌باشند. امپدانس این نوع بارها در همه شرایط ولتاژ سیستم ثابت فرض می‌شود. بار امپدانس ثابت، توان‌های اکتیو و راکتیو کمتری را نسبت به بار توان ثابت در ولتاژ پایین‌تر از ولتاژ نامی، جذب می‌کند.

مدل ترکیبی

مدلی که اغلب برای وابستگی به ولتاژ به بار نیز استفاده می‌شود، مدل چند جمله‌ای است. از مدل چند جمله‌ای مرتبه دوم بیشتر استفاده می‌شود؛ زیرا تقریب با چند جمله‌ای مرتبه بالاتر به مدل‌سازی دقیق بار کمک نمی‌کند، زیرا در هنگام تعیین مشخصه استاتیک آزمایشی یا محاسبه، اشتباهات خاصی انجام می‌شود. مدل چند جمله‌ای که به طور گسترده استفاده می‌شود برابر:

$$P = P_0 \left[p_z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + p_l \left(\frac{V}{V_0} \right) + p_p \right] \quad (3-18)$$

$$Q = Q_0 \left[q_z \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 - q_l \left(\frac{V}{V_0} \right) + q_p \right] \quad (3-19)$$

این مدل که به ZIP نیز معروف است، شامل سه مولفه اصلی است: **امپدانس ثابت (Z)**، **جریان ثابت (I) و توان ثابت (P)**. پارامترهای P_I, P_Z و P_P به ترتیب ضرایب توان مولفه‌های امپدانس ثابت، جریان ثابت و توان ثابت بار اکتیو می‌باشند. بار کل نوع امپدانس با ضریب $P_Z=1$ ، نوع بار جریان ثابت با $P_I=1$ و امپدانس ثابت با $P_P=1$ مدل می‌شود، در حالی که سایر ضرایب برابر با صفر هستند.

مدل نمایی

اغلب وابستگی بار به ولتاژ و فرکانس با مدل نمایی ارائه می‌شود. شکل دیگر نمایش وابستگی بارهای اکتیو و راکتیو نسبت به ولتاژ استفاده از مدل نمایی بار به شکل زیر است:

$$P = P_0 \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{pv}} \right] \quad (3-20)$$

$$Q = Q_0 \left[\left(\frac{V}{V_0} \right)^{K_{qv}} \right] \quad (3-21)$$

به طوری که K_{pv} ضریب وابستگی بار اکتیو نسبت به تغییرات ولتاژ، K_{qv} ضریب وابستگی بار راکتیو نسبت به تغییرات ولتاژ، V ولتاژ تغذیه بار در نقطه کار داده شده، V_0 ولتاژ تغذیه بار در نقطه کار اولیه داده شده که می‌تواند نقطه کار نامی باشد. P_0 و Q_0 توان اکتیو و راکتیو مصرفی بار در ولتاژ V_0 است. P و Q توان اکتیو و راکتیو مصرفی بار در ولتاژ کار V هستند. اگر مولفه‌های پارامترهای مدل، K_{qv} و K_{pv} به ترتیب صفر، یک یا دو باشد و نمایانگر مشخصه‌های بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت خواهد بود. در بارهای ترکیبی، مقادیر هر مولفه

به ویژگی‌های اجزای تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد. ضرایب خودتنظیم مدل نمایی، K_{qv} و K_{pv} درصد تغییرات توان واقعی و راکتیو را به ترتیب برای درصد تغییر ولتاژ در مجاورت ولتاژ اسمی نشان می‌دهد. بنابراین K_{qv} و K_{pv} را می‌توان مشتقات جزئی توان واقعی و راکتیو با توجه به ولتاژ یا ضرایب حساسیت نامید.

تقسیم‌بندی مصارف مختلف

طبقه‌بندی بارها باید بر پایه و اساس مشخصی صورت گیرد. بارها را می‌توان با توجه به شرایط محیطی و جغرافیائی، نوع مصرف‌کننده و میزان مصرف تقسیم‌بندی کرد. تقسیم‌بندی بارها بر اساس یکی از شیوه‌های فوق و یا ترکیبی از آنها صورت می‌گیرد. در جدول (۱-۳) جزئیات این طبقه‌بندی نشان داده شده است.

بنابراین بیشتر روشهای پخش بار، یک بار را به عنوان یک مقدار ثابت توان اکتیو و راکتیو مدل می‌کنند؛ که به عنوان مدل بار با توان ثابت شناخته می‌شود و مستقل از مقدار ولتاژ است. از طرفی ائتلاف انرژی و ظرفیت میزبانی را می‌توان با مدل بار چندسطحی و سناریوبندی با توجه به انواع و سطوح مختلف بار با دقت بیشتری محاسبه کرد. این موارد در فصل بعد آورده خواهد شد.

جدول ۱-۳: جزئیات طبقه‌بندی بارها

ردیف	شیوه طبقه‌بندی	طبقه‌بندی
۱	نوع تاسیسات	شهری
		غیرشهری
۲	شرایط محیطی	مسکونی
		تجاری
		صنعتی
۳	میزان مصرف	سبک
		سنگین

پخش بار در شبکه توزیع شعاعی

پخش بار سیستم توزیع ابزاری اساسی در سیستم است زیرا نقطه اصلی اتصال بین توان تولیدی و مصرف‌کننده است. با حل آن پارامترهای مختلف مانند ولتاژ، جریان و تلفات محاسبه می‌شود. برای بررسی مسائل مربوط به برنامه‌ریزی، طراحی، بهره‌برداری و کنترل، پخش بار باید برای سیستم توزیع بررسی شود. هدف اصلی از تجزیه و تحلیل پخش بار، به دست آوردن توان واقعی و راکتیو جریان یافته در هر خط همراه با اندازه و زاویه فاز ولتاژ در هر باس سیستم برای شرایط بارگیری مشخص است.

انواع متنوعی از مطالعات از ساختار شعاعی سیستم توزیع برای انجام تجزیه و تحلیل پخش بار استفاده می‌کنند. روش‌های پخش بار روش نیوتن-رافسون، گوس سایدل و دیکوپله سریع برای سیستم توزیع مزیت ندارد؛ زیرا بیشتر مبتنی بر توپولوژی مشبک سیستم انتقال معمولی است در حالی که اکثر سیستم‌های توزیع دارای توپولوژی شعاعی یا درخت هستند. علاوه بر این، سیستم توزیع از نسبت R/X بالایی برخوردار است، که باعث می‌شود سیستم توزیع برای روش‌های متداول پخش بار به طور ذاتی نا همگام باشد و این احتمال وجود دارد که همگرا نشوند [۴۲].

بر این اساس، معمولاً برای حل مسئله پخش بار از روش شناخته‌شده پسر-پیشرو بهره گرفته می‌شود. روش جاروب پسر-پیشرو به دلیل سرعت محاسباتی بالا، مصرف پایین حافظه و ویژگی همگرایی مناسب، به طور گسترده‌ای در محاسبات پخش بار شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم کلی پخش بار، شامل دو مرحله اساسی، یعنی جاروب پسر و جاروب پیشرو است که این مراحل به صورت متوالی تکرار می‌شوند تا شرایط همگرایی برقرار گردد.

برای سیستم توزیع نامتعادل، از جاروب عقب برای محاسبه جریان انشعاب و از جاروب جلو برای محاسبه ولتاژ باس استفاده می‌شود. رویکرد مبتنی بر نظریه شبکه نردبان، شبکه را از انتهای بار خود تا انتهای منبع ردگیری می‌کند. الگوریتم پخش بار باید کارآمد باشد زیرا باید چندین بار اجرا شود. روشی که می‌تواند با استفاده از ویژگی‌های ساختاری شبکه توزیع، مستقیماً راه‌حل پخش بار سیستم توزیع شعاعی را پیدا کند. در این روش فرمول بندی ماتریس ژاکوبی، که در روش‌های معمول مورد نیاز است، نادیده گرفته می‌شود.

روش پسرو و پیشرو

روش جاروب پسرو پیشرو برای پخش بار یک تکنیک تکراری است که در آن، در هر تکرار دو مرحله محاسباتی انجام می‌شود. با کمک دو مجموعه معادله بازگشتی، می‌توان پخش بار شبکه تک منبع را به صورت تکراری حل کرد. اولین مجموعه معادلات برای محاسبه جریان قدرت در شاخه‌ها از آخرین شاخه شروع می‌شود و در جهت عقب به سمت گره ریشه پیش می‌رود. از مجموعه دوم معادلات برای محاسبه مقدار ولتاژ و زاویه فاز هر گره استفاده می‌شود که از گره ریشه شروع می‌شود و در جهت جلو به سمت آخرین گره پیش می‌رود.

جاروب پسرو

در جاروب پسرو، جریان شاخه در هر بخش با در نظر گرفتن ولتاژهای تکرار قبلی در هر گره به روز می‌شود. از شاخه‌ها از آخرین گره شروع می‌شود و به سمت شاخه‌های متصل به گره ریشه حرکت می‌کند. جریان‌های موثر توان به روز شده در هر شاخه با محاسبه ولتاژ گره تکرارهای قبلی در محاسبه انتشار عقب بدست می‌آید. این بدان معناست که مقادیر ولتاژ بدست آمده در مسیر جلو هنگام انتشار به عقب ثابت نگه داشته می‌شود و جریان‌های به روز شده توان در هر شاخه با استفاده از مسیر عقب در طول فیدر به عقب منتقل می‌شوند. این نشان می‌دهد که انتشار پسرو از گره انتهایی شروع می‌شود و به سمت گره منبع پیش می‌رود.

جاروب پیشرو

هدف اصلی روش جاروب به جلو محاسبه افت ولتاژ با بروزرسانی‌های احتمالی جریان یا جریان توان است. در حین جابجایی پیشرو، ولتاژهای گره‌ای از شاخه‌های گره اول به سمت ولتاژ آخر به روز می‌شوند. در طول انتشار به جلو، توان موثر در هر شاخه به مقدار بدست آمده در روش جاروب عقب ثابت می‌ماند. تکرار متوالی با مقایسه ولتاژهای محاسبه شده در تکرارهای قبلی و حال بدست می‌آید. در صورت عدم تطابق ولتاژ کمتر از حد مشخص شده، همگرایی حاصل می‌شود. در غیر این صورت جریان‌های موثر جدید در هر شاخه از طریق رفت و برگشت با ولتاژهای فعلی ارزیابی می‌شوند و سپس روش تا زمان راه‌حل تکرار می‌شود.

الگوریتم برای روش پسرو و پیشرو

مراحل عمده الگوریتم پیشنهادی با معادلات مناسب در زیر خلاصه می‌شود.

- مرحله ۱: ولتاژ نامی فقط برای تکرار اول در گره‌های انتهایی فرض می‌شود و برابر با مقدار محاسبه شده در جاروب پیشرو در تکرار متوالی است.
- مرحله ۲: شروع با گره انتهایی و جریان گره را با استفاده از معادله (۳-۲۹) محاسبه می‌شود. برای تعیین جریان جاری از گره i به سمت گره $i+1$ توسط معادله (۳-۳۰)، از گره انتهایی شروع و برابر مجموع جریان قبلی و جریان‌های ناشی از گره $i+1$ شود.

$$I_i = \left(\frac{S_i}{V_i}\right)^* \quad (3-22)$$

$$I(i, i+1) = I(i+1) + \sum (in+1) \quad (3-23)$$

- مرحله ۳: ولتاژ موجود در گره با استفاده از معادله (۳-۳۱) را با این مقدار جریان ارزیابی شود. در گره اتصال ولتاژ محاسبه شده محفوظ است.

$$V_i = V(i+1) + I(i, i+1) * Z(i, i+1) \quad (3-24)$$

- مرحله ۴: با یک گره انتهایی دیگر سیستم شروع و ولتاژ و جریان مانند مرحله ۲ و ۳ ارزیابی شود.

- مرحله ۵: با استفاده از معادله (۳-۲۹) جریان با کمک آخرین ولتاژ در گره اتصال ارزیابی شود و تا گره مرجع ادامه داده شود.

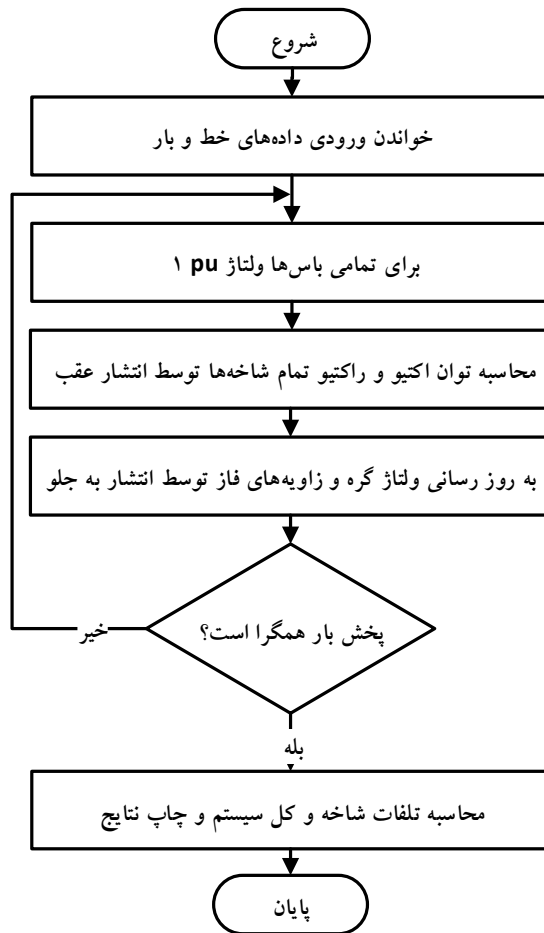
- مرحله ۶: مقدار ارزیابی شده ولتاژ نامی در گره مرجع را با ولتاژ مشخص مقایسه شود. اگر اختلاف ولتاژ کمتر از معیارهای تعیین شده است، متوقف شود، در غیر این صورت جاروب پیشرو شروع خواهد شد.

جاروب پیشرو

- مرحله ۱: در ولتاژ نامی با گره مرجع شروع و با استفاده از معادله (۳-۳۱) ولتاژ گره را در جهت جلو، از گره مرجع به گره‌های انتهایی ارزیابی شود.

- مرحله ۲: دوباره با جاروب عقب شروع و ولتاژ باس به روز شده در جاروب جلو ارزیابی شود.

فلوچارت برای روش پسرو و پیشرو در شکل (۳-۵) آورده شده است.



شکل ۳-۵: فلوچارت روش پسر و پیشرو

الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی

بهینه‌سازی CPLEX یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های هوشمند می‌باشد. سادگی و بار محاسبات کم، این الگوریتم را در بسیاری از حوزه‌ها محبوب و قدرتمند کرده است. CPLEX یک الگوریتم مبتنی بر شاخه زنی است که توسط ابره‌ارت و کندی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته طراحی شده است. در CPLEX پایه سرعت و موقعیت هر ذره مطابق (۳-۲۷) و (۳-۲۸) به روز می‌شود [۴۳]:

$$v_i(k+1) = wv_i(k) + p_1c_1(p_i^{best} - x(k)) + p_2c_2(Gx_i(k)) \quad (3-25)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k) \quad (3-26)$$

جایی که i یک شاخص ذره، k یک عدد تکرار، $v_i(k+1)$ سرعت ذره، $x_i(k+1)$ موقعیت ذره در تکرار k است؛ p_i^{best} بهترین موقعیت یافت شده توسط ذره i (بهترین شخصی)، G بهترین موقعیت یافت شده توسط جمعیت است (بهترین جهانی، بهترین بهترین‌های شخصی). w ضریب اینرسی (ضریب وزن) که معمولاً از بازه $[0, 4, 0, 9]$ انتخاب می‌شود. $p1$ و $p2$ اعداد تصادفی در بازه $[0, 1]$ هستند. $c1$ و $c2$ ضرایب یادگیری ذرات معمولاً از بازه $[1, 2]$ که عوامل جذب ذرات به سمت بهترین موقعیت خود یا به سمت بهترین موقعیت دسته را نشان می‌دهند.

بردار سرعت هر یک از ذرات در ابتدای هر مرحله از الگوریتم، بر اساس اطلاعات شخصی ذره و همچنین اطلاعات سایر ذرات به‌روزرسانی می‌شود $pbest$. به نقطه‌ای اطلاق می‌شود که تا این مرحله از الگوریتم، ذره موردنظر کمترین فاصله را از محل پاسخ بهینه داشته و در آن بیشترین میزان برازندگی (Fitness) خود را کسب کرده است. از سوی دیگر، $Gbest$ نمایانگر نزدیک‌ترین نقطه بهینه‌ای است که تا این مرحله توسط تمامی ذرات اشغال شده و در آن بیشترین میزان برازندگی حاصل شده است.

میزان سرعتی که ذرات در هر مرحله کسب می‌کنند، نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد الگوریتم دارد. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، لازم است سرعت ذرات محدود شود؛ بنابراین باید سرعت ذرات مطابق رابطه زیر محدود گردد:

$$-V_{max} \leq V(k) \leq V_{max}$$

در صورتی که مقدار V_{max} بسیار بزرگ انتخاب شود، ذرات ممکن است از پاسخ‌های قبلی خود فاصله گرفته و بهینه‌یابی را دشوار کنند؛ و اگر V_{max} بسیار کوچک باشد، ذرات ممکن است قادر به کشف پاسخ‌های محلی بهتر نباشند.

فلوچارت مفهومی روند CPLEX در شکل (۳-۶) [۴۳] نشان داده شده است. CPLEX نسبت به سایر تکنیک‌های بهینه‌سازی دارای مزایای مشخصی است. از نظر مفهوم ساده، سهولت در اجرا و از نظر محاسبه سرعت و کارایی کارآمد است. الگوریتم CPLEX به طور کلی شامل چهار مرحله اساسی است: مقداردهی اولیه ذرات، به‌روزرسانی بردار سرعت، به‌روزرسانی موقعیت ذرات و تعیین معیارهای توقف. هر مرحله به صورت زیر تعریف می‌شود:

- مقداردهی اولیه: بردارهای موقعیت n بصورت تصادفی مقداردهی اولیه می‌شوند. عناصر به طور یکنواخت در محدوده‌های مناسب توزیع می‌شوند. به طور موازی،

بردارهای n سرعت به طور تصادفی مقداردهی اولیه می‌شوند و سپس به طور یکنواخت بین حداکثر و حداقل حد توزیع می‌شوند. یک تابع هدف برای ارزیابی تناسب هر ذره اختصاص داده شده است. بنابراین، بهترین‌های محلی هر ذره با موقعیت اولیه خود، بهترین‌های جهانی به بهترین تناسب^۱ در میان بهترین افراد محلی، آغاز می‌شود. در صورت لزوم می‌توان در ابتدا محدوده‌های وزن اینرسی را تنظیم کرد.

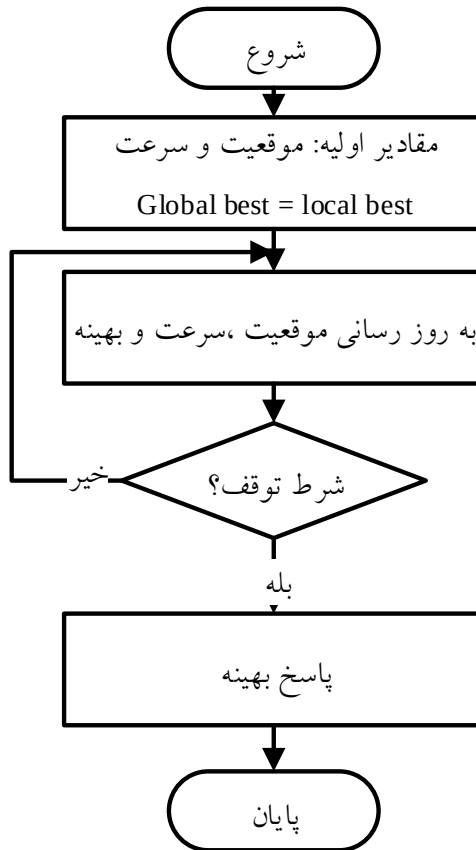
- به روزرسانی سرعت ذره: این کار را می‌توان از طریق دو اصطلاح انجام داد. بخش اول مولفه اینرسی است که مربوط به حفظ همان جهت حرکت ذرات همان تکرار قبلی است. بخش دوم، به نام مولفه شناختی^۲ مربوط به بازگشت ذره به بهترین محلی است که تاکنون با آن روبرو شده است. بنابراین، این مورد به عنوان حافظه ذرات عمل می‌کند.
- به روزرسانی موقعیت ذره: موقعیت ذره باید با سرعت جدید به روز شده به روز شود.
- به روزرسانی بهترین‌های محلی و بهترین‌های جهانی: این بهترین‌ها در صورت موقعیت ذرات به روز شده که منجر به مقادیر عملکرد بهتر هدف در مقایسه با موارد قبلی شود، به روز می‌شوند.
- معیارهای توقف: اگر تعداد تکرارها به حداکثر تعداد مجاز برسد یا به مقدار دلخواه تابع هدف برسد، الگوریتم خاتمه می‌یابد.

ظرفیت میزبانی

هنگامی که نفوذ سیستم فتوولتاییک پشت بامی در اقتصادهای پیشرفته کم بود، ظرفیت میزبانی اغلب فقط به عنوان یک مفهوم کوتاه مدت در نظر گرفته می‌شد، در حالی که تعاریف بعدی به صراحت بیان می‌کنند که ظرفیت میزبانی مسئله‌ای چندوجهی است. تعاریف اخیر به تدریج در امتداد توانایی مقابله با تغییر پذیری و عدم اطمینان در تولید و تقاضا رسیده‌اند. می‌توان به ظرفیت میزبانی صرفاً برای تطبیق عرضه و تقاضا اشاره کرد؛ همچنین به مدیریت ازدحام شبکه اشاره کرد یا بسیار کلی‌تر باشد و به راحتی ظرفیت میزبانی را به عنوان توانایی سازگاری با شرایط در حال تغییر تعریف نمود [۴۴].

1. Fitness

2. Cognitive Component



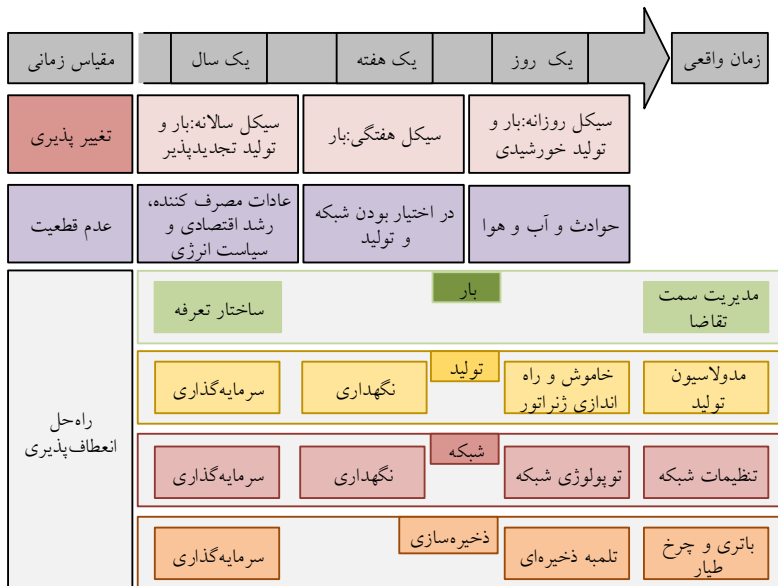
شکل ۳-۶: فلوچارت نوعی CPLEX

با توجه به تجزیه و تحلیل از وضعیت، ظرفیت میزبانی به عنوان توانایی سیستم قدرت برای مقابله با تنوع و عدم اطمینان تعریف می‌شود. این مورد نشان می‌دهد که ظرفیت میزبانی برای هر دو وظیفه اصلی یک اپراتور سیستم شامل مطابقت تولید با تقاضا و اطمینان از حفظ حدود توان و ولتاژ شبکه لازم است. همانطور که در شکل (۳-۶) نشان داده شده، تنوع و عدم اطمینان در چندین مقیاس زمانی رخ می‌دهد [۴۵]. در طولانی مدت (بیش از یک سال) تطبیق عرضه و تقاضا به دلیل دشواری پیش‌بینی سیستم فتوولتائیک پشت بامی، تکامل عادات مصرف‌کننده و رشد اقتصادی نامطمئن است. در میان مدت (افق‌های سالانه، هفتگی و روزانه)، اپراتورهای سیستم باید با تغییرات چرخه‌ای در بار باقیمانده (بار منهای تولید سیستم فتوولتائیک پشت بامی) روبرو شوند؛ این امر بر توزیع اقتصادی دارایی‌های قابل توزیع تأثیر می‌گذارد. در کوتاه مدت (درون روز)، عملکرد سیستم توسط عدم اطمینان از طریق

حوادث و پیش‌بینی تقاضا و تولید سیستم فتوولتائیک پشت بامی محدود شده و پیامدهای آن در اندازه‌گیری و فعال‌سازی ذخیره است.

مطابق شکل (۳-۷)، روشهای مختلفی وجود دارد که می‌توان با این منابع تغییرپذیری و عدم اطمینان مقابله کرد، یعنی ظرفیت میزبانی را فراهم کرد. به طور کلی، می‌توان تعدیل خروجی تولید (از جمله محدود کردن سیستم فتوولتائیک پشت بامی)، تعدیل تقاضا، ذخیره انرژی و اتصال به سیستم دیگری برای هموار کردن تغییرات در طول زمان اشاره کرد. برای کنار آمدن با عدم قطعیت طولانی مدت در مساله، می‌توان راه‌حل‌های ظرفیت میزبانی مختلفی را ایجاد و در میان مدت و عدم اطمینان کوتاه مدت، می‌توان راه‌حل موجود را فعال کرد [۴۶].

ظرفیت میزبانی عملیاتی برای کاهش اختلالات در یک سیستم برق مانند قطع یا انحراف پیش‌بینی تغذیه، یعنی نوسان تولید توربین‌های بادی یا واحدهای خورشیدی یا تغذیه برق، مانند نوسانات تقاضای بار ضروری است. معیارهایی برای ارزیابی ظرفیت میزبانی عملیاتی فنی سیستم قدرت به عنوان مثال نرخ رمپ توان، ظرفیت قدرت، ظرفیت انرژی و مدت زمان رمپ ارائه شده است. در این کار ابتدا چارچوب لازم را برای تجسم ظرفیت میزبانی عملیاتی در سیستم ایجاد می‌شود.



شکل ۳-۷: منابع مختلف عدم قطعیت و مجموعه راه‌حل‌های ظرفیت میزبانی

ادامه این بخش بدین صورت است که بخش ظرفیت میزبانی عملیاتی در مورد تعریف ظرفیت میزبانی عملیاتی و نقش آن در عملکرد سیستم قدرت بحث می‌کند. همچنین معیارهای لازم برای ظرفیت میزبانی عملیاتی شاخص‌های ارزیابی را معرفی می‌کند. بخش ظرفیت میزبانی با ذخیره ساز توضیح می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از چارچوب تعیین شده، ظرفیت میزبانی را با رویکرد ذخیره ساز پیاده و ارزیابی کرد.

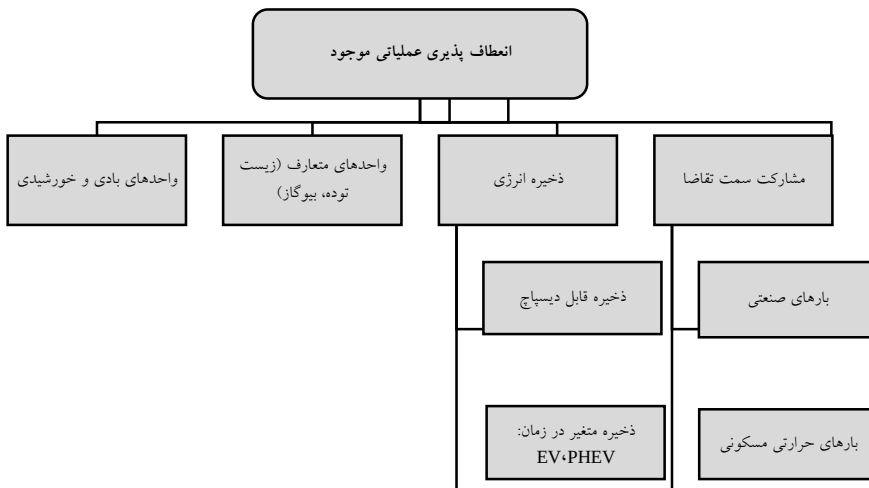
ظرفیت میزبانی عملیاتی

ظرفیت میزبانی عملیاتی یک ویژگی مهم در سیستم بوده و برای کاهش آشفتگی در سیستم قدرت مانند قطع یا انحراف تغذیه از توربین‌های بادی یا واحدهای فتوولتائیک یا تقاضای بار، ضروری است. وجود ظرفیت میزبانی عملیاتی کافی یک پیش شرط لازم برای یکپارچه‌سازی شبکه با سهم زیادی از تغذیه سیستم فتوولتائیک پشت بامی متغیر است.

منابع ظرفیت میزبانی عملیاتی

مطابق شکل (۳-۸) منابع مختلف ظرفیت میزبانی در سیستم وجود دارد. ظرفیت میزبانی عملیاتی را می‌توان در سمت تولید به صورت نیروگاه‌های متداول با سرعت سریع و در سمت تقاضا با استفاده از منحنی تقاضای بار برای جذب بهتر انرژی سیستم فتوولتائیک پشت بامی پاسخ داد علاوه بر این، تغذیه سیستم فتوولتائیک پشت بامی نیز می‌تواند محدود شود. همچنین، ظرفیت ذخیره‌سازی ثابت و متغیر با زمان برای ارائه انواع مختلف ظرفیت میزبانی عملیاتی مناسب است. ظرفیت میزبانی عملیاتی را می‌توان از طریق خطوط اتصال شبکه برق از سایر مناطق نیز بدست آورد؛ در صورتی که ظرفیت میزبانی عملیاتی موجود در منطقه شبکه خود کافی یا گران نباشد. ظرفیت واردات و صادرات برق در دسترس، امروزه با تسهیل هرچه بیشتر بازارهای ملی و بین‌المللی برق، در عملکرد روزانه سیستم برای انجام تعادل توان اکتیو و کاهش مشکلات جریان برق شبکه جداگانه با بهره‌گیری از پتانسیل ظرفیت میزبانی سایر مناطق شبکه استفاده می‌شود. برای عملکرد سیستم برق، واردات مورد نیاز در شرایط خاص و صادرات تغذیه نامطلوب در سایر شرایط به مناطق شبکه همسایه، فعلاً راحت‌ترین و ارزان‌ترین اقدام برای افزایش ظرفیت میزبانی عملیاتی است. با این وجود، واردات و صادرات توان فقط در محدوده‌های ظرفیت انتقال خط توافق شده بین مناطق شبکه انجام می‌شود. این بحث همچنین به محدودیت‌های خط فیزیکی شبکه در یک منطقه شبکه

گسترش می‌یابد، که ممکن است به طور موثر تحویل ظرفیت میزبانی عملیاتی یعنی توان را بین باس‌های منفرد محدود کند.



شکل ۳-۸: منابع مختلف ظرفیت میزبانی در سیستم های قدرت.

تعاریف ظرفیت میزبانی عملیاتی

ظرفیت میزبانی عملیاتی توانایی فنی واحد سیستم قدرت در تعدیل تغذیه برق به شبکه یا خروجی برق از شبکه در طول زمان است. این به معنی توانایی فنی یک اپراتور شبکه برای تعدیل جریان ورودی یا خروجی برق در مقیاس بزرگ است. به عنوان مثال برای دستیابی به تعادل توانی و در یک توپولوژی شبکه، یعنی برای کنترل جریان‌های توان از طریق مدولاسیون تزریق و خروجی در گره‌های خاص شبکه خواهد بود.

طبقه‌بندی ظرفیت میزبانی عملیاتی

طبقه‌بندی ظرفیت میزبانی عملیاتی در منابع و ذخایر، با الهام از سیستم طبقه‌بندی برای منابع طبیعی به عنوان مثال نفت خام، گاز طبیعی و زغال سنگ، در زیر ارائه شده است. دسته‌بندی برای طبقه‌بندی ظرفیت میزبانی عملیاتی موجود عبارتند از:

- منابع ظرفیت میزبانی بالقوه، یعنی منابع ظرفیت میزبانی از نظر فیزیکی وجود دارند و می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. قابلیت کنترل لازم و همچنین قابلیت مشاهده بر روی واحدهای سیستم قدرت وجود ندارد.
- منابع واقعی ظرفیت میزبانی، یعنی بخشی از منابع ظرفیت میزبانی بالقوه که می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند؛ زیرا قابلیت کنترل و همچنین قابلیت مشاهده بر روی واحدهای سیستم قدرت وجود دارد.
- ذخایر ظرفیت میزبانی، بخشی از منابع واقعی ظرفیت میزبانی را می‌توان از نظر اقتصادی استفاده کرد.
- ذخایر ظرفیت میزبانی موجود در بازار، یعنی بخشی از ذخایر ظرفیت میزبانی که می‌توان از بازارهای برق یا خدمات جانبی تهیه کرد. محدودیت‌های ناشی از ساختار خدمات جانبی ممکن است میزان ظرفیت میزبانی عملیاتی را که در واقع می‌تواند در عمل تهیه شود، محدود کند.

معیارهای ظرفیت میزبانی عملیاتی

برای اهداف تجزیه و تحلیل، توانایی فنی برای ارائه ظرفیت میزبانی عملیاتی باید توسط معیارهای ظرفیت میزبانی مناسب مشخص و طبقه‌بندی شود. برای ارزیابی ظرفیت میزبانی عملیاتی مورد نیاز سیستم، چهار معیار زیر مشخص شده است [۴۴]:

- ظرفیت تأمین توان π (مگاوات)
 - ظرفیت نرخ رمپ توان P (مگاوات/دقیقه)
 - ظرفیت تأمین انرژی ϵ (مگاوات ساعت)
 - مدت زمان رمپ (دقیقه)
- از آنجا که طول رمپ در واقع به نرخ رمپ توان و ظرفیت توان به عنوان $\frac{\pi}{\rho}$ وابسته است، بنابراین استفاده از معیارهای مربوط به توان P, ϵ, π و برای توصیف ظرفیت میزبانی کافی است. بنابراین ظرفیت میزبانی عملیاتی مجموعه دستیابی است که با حداکثر قابلیت ظرفیت میزبانی، یعنی سه معیار $\max^{\pm} P, \max^{\pm} \epsilon$ و $\max^{\pm} \pi$ محدود می‌شوند. این سه معیار به دلیل پیوند بین زمانی آنها مطابق معادله (۳-۲۷)، سه گانه ظرفیت میزبانی در عملکرد سیستم قدرت را تشکیل می‌دهند.

$$\rho \xleftrightarrow{\frac{dt}{d}} \pi \xleftrightarrow{\frac{dt}{d}} \epsilon, \pi = \rho.t, \epsilon = \frac{1}{2}.\rho.t^2 \quad (3-27)$$

معیارهای ظرفیت میزبانی از نظر رویکردها بسیار متنوع است. یک گزینه صرفاً جمع‌آوری شاخص‌های ظرفیت میزبانی منفرد است. معیارهای کیفیت سنتی از جمله انرژی مصرف نشده، مدت زمان و احتمال از دست دادن بار، کاهش و استفاده از بار قطع شونده، رمپ، حداقل خروجی توان، هزینه‌های راه‌اندازی و حداقل تولید همزمان در بسیاری از موارد در نظر گرفته شده‌اند. دو شاخص با توجه به ظرفیت میزبانی برای ازدحام شبکه و نه تطبیق عرضه و تقاضا، برجسته هستند.

تحلیل ظرفیت میزبانی در شبکه توزیع با رویکرد ارزیابی ذخیره ساز

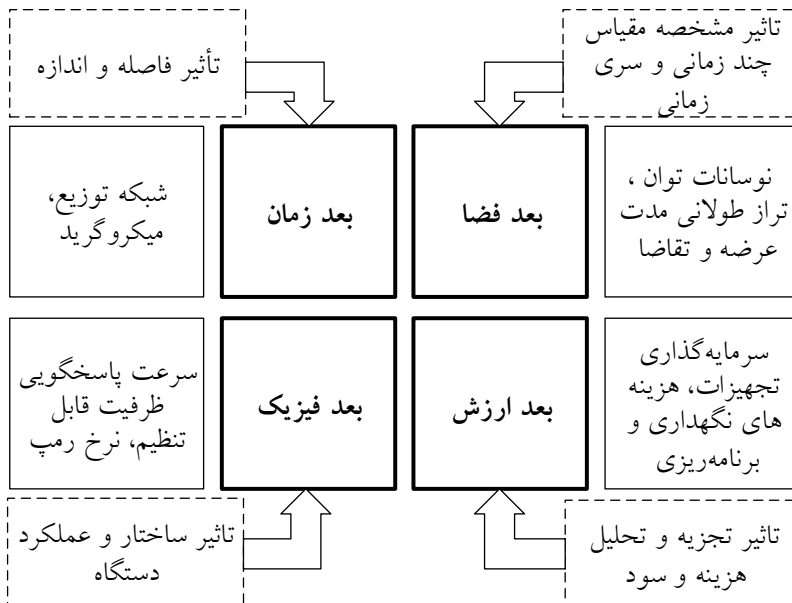
ظرفیت میزبانی شبکه توزیع اساساً نشان‌دهنده توانایی سیستم توزیع برای هماهنگی کامل منابع قابل کنترل برای کنار آمدن با عدم قطعیت‌های ناشی از نفوذ سیستم فتوولتائیک پشت بامی است. ظرفیت میزبانی عملیاتی به شبکه توزیع اجازه می‌دهد تا با محیط‌های پیچیده عملیاتی سازگار شود و عملکرد با بازده بالا را حفظ کند. ظرفیت میزبانی یک ویژگی ذاتی چند بعدی یک سیستم است. همانطور که در شکل (۳-۹) نشان داده شده است، چهار عنصر ظرفیت میزبانی در بعد زمان، فضا، ارزش و مقدار به عنوان عوامل تعیین کننده ظرفیت میزبانی شناخته شده‌اند.

مشخصه زمانی ظرفیت میزبانی سیستم شامل دو جنبه است. یکی از ویژگی‌های سری زمانی منابع، ظرفیت میزبانی است. توانایی برنامه‌ریزی منابع مبتنی بر ذخیره انرژی عمده‌ها توسط ظرفیت قابل تنظیم نشان داده می‌شود، که به طور پویا با وضعیت عملکرد فعلی تغییر می‌کند و از نزدیک با استراتژی کنترل برنامه‌ریزی همراه است. بنابراین، مسائل ظرفیت میزبانی فقط از یک مسئله نقطه‌ای به مسئله سری زمانی تغییر می‌یابد. جنبه دیگر ویژگی مقیاس چند زمانی ظرفیت میزبانی سیستم است. منابع مختلف انعطاف‌پذیر، تفاوت آشکاری در مقیاس زمانی سرعت پاسخ و ظرفیت نظارتی [۳۵] دارند، مانند کنترل توان در زمان واقعی ذخیره ساز و جبران توان راکتیو ساعتی بانک‌های خازن. بنابراین، ویژگی ظرفیت میزبانی سیستم در مقیاس‌های زمانی، که ویژگی مقیاس چند زمانه آن را تشکیل می‌دهد، به طور قابل توجهی متفاوت است.

با توجه به محدودیت اتصال و ظرفیت انتقال یک شبکه الکتریکی، منابع انعطاف‌پذیر نمی‌توانند آزادانه در کل سیستم جریان داشته باشند. بنابراین، توزیع فضایی منابع انعطاف‌پذیر عامل مهمی است که بر ظرفیت میزبانی سیستم تأثیر می‌گذارد.

به عنوان یک مقدار فیزیکی مجازی که نشان دهنده قابلیت برنامه‌ریزی شبکه توزیع است، ظرفیت میزبانی اساساً به ویژگی‌های فیزیکی منابع انعطاف‌پذیر بستگی دارد. از منظر تأمین ظرفیت میزبانی، منابع ظرفیت میزبانی شبکه توزیع انواع مختلفی مانند میکرو شبکه، دستگاه‌های الکترونیکی قابل کنترل و منابع سمت تقاضا را پوشش می‌دهد. از منظر تقاضای ظرفیت میزبانی، حتی برای یک منبع ظرفیت میزبانی منفرد، قابلیت تنظیم مقررات برای سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی شبکه باید شامل ظرفیت قابل تنظیم، سرعت پاسخ، سرعت رمپ و انواع مختلف شاخص‌های عملکردی باشد.

بهبود یا استفاده از ظرفیت میزبانی سیستم توزیع به هزینه‌هایی نیاز دارد که نشان دهنده مشخصه ارزش ظرفیت میزبانی است. به همین ترتیب، از طریق برنامه‌ریزی بهینه منابع ظرفیت میزبانی، شبکه توزیع توانایی بالایی در مقابله با عدم قطعیت خواهد داشت. در محیط عملیاتی پیچیده واقعی، با دستیابی به هدف محیط، قابلیت اطمینان و اقتصاد برای سیستم مزایای جامعی حاصل خواهد شد. در نظر گرفتن هزینه و سود، ویژگی ارزش ظرفیت میزبانی در شبکه توزیع است.



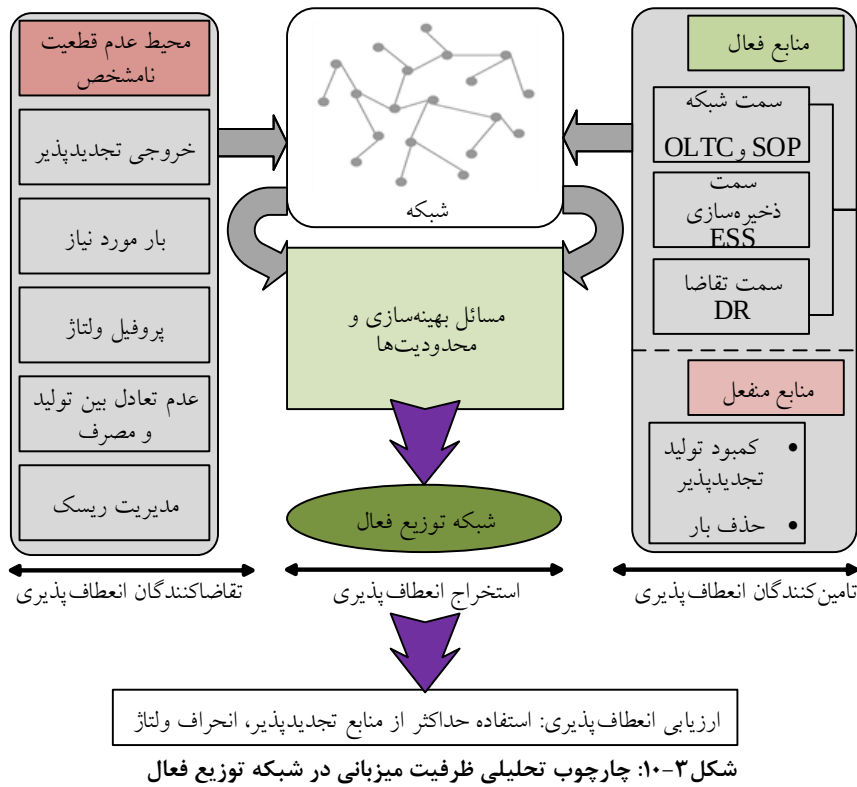
شکل ۳-۹: ویژگی‌های چند بعدی ظرفیت میزبانی در سیستم توزیع

بر اساس توانایی تنظیم جریان مداوم و سریع جریان در بعد فیزیک [۳۷]، منابع مبتنی بر ذخیره ساز اساس بهبود ظرفیت میزبانی سیستم را ایجاد می‌کنند. ذخیره ساز اتصال انعطاف پذیر بین چندین فیدر را امکان پذیر می‌کند، به طور موثر دامنه تنظیم ظرفیت میزبانی در بعد فضا را گسترش می‌دهد [۳۸]. برای بعد مقدار، ذخیره ساز با هزینه‌های زمان‌بندی کمتری نسبت به عملکرد کلیدزنی معمولی تنظیم می‌شود. با توسعه و کاهش قیمت دستگاه‌های الکترونیکی قدرت، سود منفی حاصل از ذخیره ساز آشکارتر می‌شود. بنابراین، منابع ظرفیت میزبانی مبتنی بر ذخیره ساز می‌توانند به طور قابل توجهی ظرفیت میزبانی شبکه توزیع را برای مقابله با مسائل ناشی از نفوذ زیاد سیستم خورشیدی پشت بامی بهبود بخشند.

مطالبان و تأمین‌کنندگان ظرفیت میزبانی

مسئله ولتاژ و هزینه انرژی (به ویژه در اثر ائتلاف توان) دو نگرانی عمده اپراتورهای شبکه توزیع هستند که می‌توانند با کنترل توان اکتیو و راکتیو به درستی رفع شوند [۱۴]، علاوه بر این، افزایش سریع نفوذ تولید سیستم فتوولتائیک پشت بامی در شبکه‌های توزیع باعث ایجاد عدم اطمینان قابل توجهی در نوسانات شدید و متناوب آنها شده است؛ پروفایل‌های بار نیز دارای عدم قطعیت ذاتی هستند که نمی‌توان آنها را نادیده گرفت. این عوامل تقاضای اصلی ظرفیت میزبانی عملیاتی در شبکه توزیع را ایجاد می‌کنند، که ممکن است باعث زیان اقتصادی و انحراف ولتاژ بالاتر یا حتی مسائل پایداری شود. همچنین، عدم تعادل بین تولید برق و مصرف در کل سیستم شبکه توزیع بر کارایی استفاده از انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی تأثیر می‌گذارد.

همانطور که در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است، اگر این عدم قطعیت‌ها به طور موثر از قبل کاهش نیابند، ممکن است خطرات بزرگی در رابطه با نقض ولتاژ و هزینه بالای عملیاتی در حین بهره برداری از زمان واقعی سیستم وجود داشته باشد، که برای قابلیت اطمینان عملیاتی و اقتصاد آن مناسب نیست. برای غلبه بر این مسئله، شبکه توزیع باید ظرفیت میزبانی بیشتری در سیستم داشته باشد تا توانایی جبران عدم قطعیت و انتقال توان به دو بعد فضایی و زمانی را فراهم کند.



به طور خاص، تأمین‌کنندگان ظرفیت میزبانی سیستم از منابع فعال و منفعل تشکیل شده‌اند که در آن منابع فعال به منابع قابل تقاضای شبکه ذخیره قابل استفاده برای تنظیم ولتاژ و ریسک‌گریزی اشاره دارند و منابع غیرفعال به کاهش بار و محدودیت سیستم فتوولتاییک پشت بامی اشاره دارند که فقط در صورت لزوم در حالات خطای شدید انجام می‌شود. در مورد منابع فعال، بیشتر به منابع قابل کنترل در مقیاس مکانی و زمانی تقسیم می‌شوند، مطابق شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که ذخیره ساز، دستگاه‌های الکترونیکی کاملاً کنترل شده برای تحقق اتصال انعطاف‌پذیر بین فیدرها با توانایی کنترل دقیق و مداوم توان اکتیو و راکتیو که به تنظیم جریان توان کل سیستم کمک می‌کند. بنابراین چگونگی به اثرات سودمند ذخیره ساز و تحقق هماهنگی با سایر منابع سنتی در شبکه توزیع، نکته اصلی این مطالعه است.

تعریف و ارزیابی شاخص ظرفیت میزبانی

طبق تعریف، ظرفیت میزبانی به عنوان توانایی تبدیل شبکه توزیع از قابلیت کنترل در منابع تقاضای شبکه ذخیره تعریف شده است که برای بهبود سطح عملیاتی سیستم در یک محیط با عدم قطعیت استفاده می‌شود و می‌تواند در دسترس شبکه توزیع برای انطباق خود با یک عملیات اقتصادی و غیرریسک قرار گیرد. مطابق تعریف، برای تعیین کمیت ظرفیت میزبانی عملیاتی سیستم شبکه توزیع، شاخص ارزیابی تعریف شده است:

- استفاده از انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی: به میزان واقعی استفاده از توان سیستم فتوولتائیک پشت بامی اشاره دارد.

- انحراف ولتاژ: درجه‌ای که ولتاژها از یک مقدار در یک افق زمانی منحرف می‌شوند. در این راستا استفاده واقعی از انرژی‌های سیستم فتوولتائیک پشت بامی به معنای استفاده از حداکثر ظرفیت واحدهای سیستم فتوولتائیک پشت بامی در سیستم توزیع است. اغلب در یک سیستم این واحدهای سیستم فتوولتائیک پشت بامی سعی در تولید توان در نزدیکی بار دارند اما به دلیل محدودیت‌های موجود در سیستم نیاز به انتقال توان در سطح شبکه توزیع به منظور تامین بار وجود دارد. این خطوط ارتباطی دارای ظرفیت مشخصی هستند.

شاخص اصلی

تراکم شبکه^۱ نتیجه محدودیت‌های شبکه است که مشخص‌کننده ظرفیت شبکه محدودی است که مانع از تحویل همزمان از یک مجموعه تبادل توان مرتبط می‌شود. در این کار تمرکز بر توانایی شبکه توزیع در انتقال توان اکتیو است. تراکم در شبکه‌های توزیع به وضعیتی گفته می‌شود که تقاضا برای انتقال توان اکتیو بیش از توان انتقال شبکه باشد. تراکم به خطوی گفته می‌شود که مرزهای حرارتی و ظرفیت‌های خط نقض شوند [۴۴]. تراکم همچنین زمانی اتفاق می‌افتد که جریان‌های توان در خط بیش از جریان مجاز با محدودیت‌های قابلیت اطمینان عملیاتی باشد [۴۵]. محدودیت‌های فیزیکی مانند محدودیت حرارتی یک خط یا یک ترانسفورماتور می‌تواند در بروز تراکم موثر باشد. محدودیت ولتاژ در یک گره، پایداری دینامیکی و گذرا، قابلیت اطمینان و موارد مشابه برخی از نمونه‌های محدودیت‌های شبکه است که منجر به ازدحام شبکه کمک خواهد شد. تراکم ممکن است به دلایل زیر رخ دهد:

- تبادلات غیرهماهنگ

- قطعی ژنراتور
- قطعی خط
- افزایش ناگهانی بار

برای اطمینان از امنیت سیستم، باید بلافاصله تراکم در سیستم اصلاح شود. ازدحام در خطوط به دلیل افزایش روزافزون تقاضای برق اتفاق می افتد و انواع مختلف بار ممکن است مشکلات زیر را ایجاد کند:

- قطعی بیشتر در یک سیستم بهم پیوسته
- منجر به خاموشی گسترده همراه با پیامدهای منفی اقتصادی
- بازده کاهش سیستم
- تأثیر بر امنیت سیستم
- عملکرد سیستم در حاشیه پایداری پایین
- افزایش هزینه‌های اضافی
- آسیب به تجهیزات سیستم

روش‌های فنی در مدیریت تراکم خطوط مورد توجه قرار می گیرند و تأثیر اقتصادی ندارند. روش‌های غیرفنی موارد تصحیح (زمانبندی مجدد سیستم) تولید محدود در امنیت، روش‌های عوامل امنیت شبکه، قیمت‌گذاری تراکم و روش‌های مبتنی بر بازار را در نظر می گیرند. از منظر بلند مدت، بهبود ظرفیت انتقال شبکه اساسی‌ترین راه‌حل برای مشکل ازدحام است. در حال حاضر دو روش اصلی فنی برای بهبود ظرفیت انتقال وجود دارد، یکی استفاده کامل از منابع شبکه موجود مثلاً تنظیم تغییر فاز/تپ ترانسفورماتور یا نصب دستگاه الکترونیک قدرت برای تنظیم پارامترهای شبکه و مورد دیگر افزایش سرمایه‌گذاری مناسب در شبکه برق، گسترش یا ساخت برخی خطوط جدید است. در میان ابزارهای فنی، بیشترین تحقیق در مورد دستگاه الکترونیک قدرت است. دستگاه ذخیره ساز دارای خصوصیتی برای پاسخگویی سریع و تنظیم پارامترها و جریان‌های سیستم است. بنابراین می تواند به طور موثر ظرفیت انتقال سیستم را بهبود بخشد، تلفات شبکه را کاهش دهد و پایداری سیستم را بهبود بخشد.

بدین ترتیب شاخص مناسب ارزیابی ظرفیت میزبانی مطابق (۳-۲۸) تعریف می شود:

$$C^{Cong} = \sum_{l=1}^{N_L} [(|P_l - P_l^{Cap}|) \times \mu_l] \quad (3-28)$$

که در آن P_l توان عبوری از خط l و P_l^{cap} ظرفیت خط l است. ضریب μ_l هزینه ازدحام و N_L تعداد خطوط است.

شاخص فرعی

در سیستم‌های توزیع، جدا از توابع توصیف‌کننده هدف و محدودیت‌هایی که عملکرد را ارزیابی می‌کنند، شاخص‌های دیگری مانند شاخص تعادل بار^۱ و شاخص انحراف ولتاژ کل^۲ نیز وجود دارد که تأثیرات راه‌حل پیشنهادی بر عملکرد PQ سیستم‌های مورد مطالعه را ارزیابی می‌کند.

تغییر وضعیت کلیدهای یک سیستم توزیع، توپوگرافی آن را تغییر می‌دهد. به نوبه خود، بارهای بین فیدرها را می‌توان برای ایجاد تعادل در سیستم و جلوگیری از بارگذاری بیش از حد فیدرها توزیع کرد [۱۶]. شاخص کل تعادل بار LBI_{tot} به عنوان مجموع شاخص‌های تعادل خطوط بیان می‌شود، به این ترتیب:

$$LBI_{tot} = \sum_{b=1}^{N_{br}} LBI_b = \sum_{b=1}^{N_{br}} \left(\frac{I_b}{I_b^{rated}} \right)^2, \forall b \in N_{br} \quad (3-29)$$

I_b جریان جاری در خط b است و مقدار نامی آن I_b^{rated} است. اگر بار کل متصل به این خط کاهش یابد، LBI یک خط خاص کاهش می‌یابد و از این رو، جریان خط کاهش می‌یابد. با این حال، ممکن است جریان‌های خط در خطوط دیگر افزایش یابد و LBI آنها افزایش یابد. برای این منظور، LBI_{tot} برای همه شاخه‌ها محاسبه می‌شود تا به تعادل بار کلی کلیه خطوط در شبکه توزیع کمک کند.

شاخص دیگر، انحراف ولتاژ کل است. انحراف ولتاژ اندازه‌گیری کیفیت ولتاژ در سیستم است. به صورت جمع انحرافات ولتاژ در تمام گره‌های سیستم از مقدار مرجع واحد پریونیت فرموله شده است و به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$AVDI = \sum_{i=1}^{N_n} |V_i - 1| \quad (3-30)$$

جایی که i و N_n به ترتیب شماره گره و تعداد کل گره‌ها هستند. یک سیستم با شاخص انحراف ولتاژ پایین نشان‌دهنده یک سیستم امن با کاهش نقض ولتاژ است.

-
1. Load Balancing Index (LBI)
 2. Aggregate Voltage Deviation Index (AVDI)

فرمول‌بندی مسئله

در این بخش ابتدا فرمولاسیون شامل تابع هدف و محدودیت‌های مسئله را بیان می‌کنیم. سپس در ادامه به روند حل مسئله و الگوریتم خواهیم پرداخت.

تابع هدف

طبق چارچوب ترسیم شده و بررسی مفهومی ظرفیت میزبانی در بخش قبل، از آنجا که ظرفیت میزبانی عمدتاً متناسب با نفوذ سیستم خورشیدی پشت بامی در سیستم است، قابلیت استحصال حداکثر توان از ظرفیت‌سیستم خورشیدی پشت بامی در ارتباط با تراکم به عنوان شاخص ارزیابی ظرفیت میزبانی و یکپارچه‌سازی ذخیره ساز در نظر گرفته می‌شود [۴۰]. مدل بهینه‌سازی برای مسئله مکان‌یابی ذخیره ساز در این بخش ساخته شده است، که در آن تابع هدف شاخص هزینه ازدحام را به حداقل برساند؛ این عملکرد شامل هزینه ازدحام و به طور ضمنی شامل تبادل توان با شبکه بالادستی و عملکرد سایر منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی است. معادله ریاضی تابع هدف تراکم شبکه به شرح زیر است.

$$\min F(1) = \sum_{l=1}^{N_l} [(P_l - P_l^{Cap}) \times \mu_l] \quad (3-31)$$

معادله (۳۱-۳) تابع تراکم خطوط را نشان می‌دهد که در آن، حاشیه ظرفیت خط (تفاضل توان عبوری و ظرفیت) در هزینه ازدحام ضرب شده است. هدف اصلی این پایان‌نامه، تعیین بهینه‌ی مکان و ظرفیت ذخیره‌سازها با در نظر گرفتن همزمان هزینه‌های اقتصادی و انعطاف‌پذیری شبکه توزیع می‌باشد. برای این منظور، از مدل‌سازی چندهدفه جهت حل مسئله پیشنهادی بهره گرفته شده است.

معادله‌ی (۳۲-۳) تابع هدف اقتصادی کل مسئله مورد نظر را ارائه می‌دهد که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز، هزینه‌های بهره‌برداری و هزینه تلفات سیستم می‌باشد. همچنین، معادلات (۳۳-۳) تا (۳۸-۳) توابع مختلف مورد نظر را مشخص می‌کنند.

در معادله‌ی (۳۲-۳) چهار مولفه اصلی وجود دارد: دو مولفه‌ی اول به ترتیب بیانگر هزینه‌های احداث و بهره‌برداری ذخیره‌ساز هستند؛ مولفه‌ی سوم هزینه تلفات شبکه را نشان می‌دهد و مولفه‌ی چهارم مربوط به هزینه‌های سالیانه تعمیر و نگهداری ذخیره‌ساز است. جزئیات محاسبات هر یک از این مولفه‌ها در معادلات بعدی ارائه شده است.

$$\min F(2) = \sum_{i=1}^{N_{SOP}} \psi_i \times IC_i^{SOP} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{SOP}} \xi_{i,t} \times OC_i^{SOP} \quad (3-32)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} P_{l,t}^{loss} \times LC + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{SOP}} \phi_{i,t} \times \exp(\beta \times P_{i,t}^{SOP})$$

$$IC_i^{SOP} = \sum_{i=1}^{N_{SOP}} K_i^{SOP} \times P_i^{SOP} \quad (3-33)$$

$$OC^{SOP} = C_{O\&M}^{SOP} + C_{ST}^{SOP} \quad (3-34)$$

$$C_{O\&M}^{SOP} = k_{O\&M}^{SOP} \times t \times P_i^{SOP} \quad (3-35)$$

$$C_{ST}^{SOP} = \left[\alpha_{ST}^{SOP} + \theta_{ST}^{SOP} \left(1 - e^{-(t_{off}/\tau)} \right) \times u_{i,t} (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \right] \quad (3-36)$$

$$IC_{cap}^{SOP} = \frac{P_i^{SOP} \times I \times t}{P_{rate}^{SOP} \times CF_i^{SOP} \times 8760} \times \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \quad (3-37)$$

$$C^{loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} 3 \times k_{l,t}^{loss} \times R_l \times I_{l,t}^2 \quad (3-38)$$

توابع هدف مورد استفاده در این مطالعه با بهره‌گیری از روش مجموع ضرایب وزنی به یک تابع واحد تبدیل می‌شوند. لازم به ذکر است که در این مسئله، مقادیر ضرایب وزنی برابر ۱ فرض شده‌اند؛ به عبارتی دیگر، وزن توابع مختلف به صورت یکسان در نظر گرفته شده است. برای محاسبه تلفات شبکه از روش Backward-Forward استفاده شده است تا نتایج نهایی پخش بار در کمترین زمان ممکن به دست آید. شایان توجه است که روش‌های سنتی مانند نیوتن-رافسون و گوس-سایدل در شبکه‌های توزیع، پاسخگو نمی‌باشند. همچنین، در رابطه‌ی (۳-۳۷)، هزینه‌های احداث ذخیره‌ساز در طول افق طراحی بلندمدت با توجه به نرخ بهره و نرخ تورم به‌روزرسانی می‌شوند تا نتایج واقعی‌تر و قابل اتکاتری برای مسئله حاصل گردد.

در این روابط IC_i^{SOP} هزینه سرمایه‌گذاری هر ذخیره‌ساز، OC_i^{SOP} هزینه بهره‌برداری ذخیره‌ساز، ψ_i متغیر باینری برای طراحی ذخیره‌ساز، و همچنین $\xi_{i,t}$ متغیر باینری برای بهره‌برداری ذخیره‌سازها می‌باشند. به علاوه، $P_{l,t}^{loss}$ مقدار تلفات شبکه در هر ساعت و

LC قیمت انرژی تلف شده برای هر بازه زمانی را نشان می دهد که بر اساس قیمت بازار برق تعیین می گردد.

محدودیت های عملکردی

محدودیت ها عمدتاً شامل محدودیت های توازن توان، محدودیت های تقاضای ظرفیت میزبانی و محدودیت های عملیاتی منابع ظرفیت میزبانی مبتنی بر ذخیره ساز هستند، که در ادامه توضیح داده شده است.

ابتدا برای برقراری محدودیت سیستم توزیع شعاعی، با تشکیل ماتریس تلاقی شبکه (ماتریس همانی شبکه) در صورتی که دترمینان این ماتریس برابر یک باشد سیستم شعاعی است. اما در غیر این صورت دترمینان غیر یک نشانگر وجود یک است که با وضع یک تابع هدف جریمه از آن جلوگیری شود.

مدل انشعاب DistFlow که در [۴۱] ارائه شده است، برای توصیف محدودیت های توازن توان شبکه توزیع استفاده می شود. این مدل می تواند از نظر ریاضی به صورت زیر تنظیم شود:

$$\sum_{j \in \Phi(i)} \alpha_{ji} (P_{ji} - r_{ji} I_{ji}^2) + P_i = \sum_{k \in \Psi(i)} \alpha_{ik} P_{ik} \quad (3-39)$$

$$\sum_{j \in \Phi(i)} \alpha_{ji} (Q_{ji} - x_{ji} I_{ji}^2) + Q_i = \sum_{k \in \Psi(i)} \alpha_{ik} Q_{ik} \quad (3-40)$$

$$U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 - x_{ij}^2) I_{ij}^2 = 0 \quad (3-41)$$

$$I_{ij}^2 U_i^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \quad (3-42)$$

$$P_i = P_i^{DG} + P_i^{SOP} - P_i^{LOAD} \quad (3-43)$$

$$Q_i = Q_i^{DG} + Q_i^{SOP} - Q_i^{LOAD} \quad (3-44)$$

معادلات (۳-۳۹) و (۳-۴۰) قانون تبدیل توان در هر گره i را نشان می دهند، جایی که $P_{s,i}$ و $Q_{s,i}$ تزریق توان اکتیو و راکتیو را در گره i نشان می دهد. $\Phi(i) \subseteq N$ مجموعه تمام والدین گره i را نشان می دهد و $\Psi(i) \subseteq N$ مجموعه همه فرزندان گره i است. α متغیر باینری است که وجود ذخیره ساز را بین فیدر نشان می دهد.

قانون اهم در مورد شاخه ij در زمان t به عنوان معادله (۳-۴۱) بیان می شود. اندازه جریان هر خط را می توان با معادله (۳-۴۲) تعیین کرد. معادلات (۳-۴۳) و (۳-۴۴) تزریق توان در هر گره i را نشان می دهد، که تولید منهای بار گره i مشخص است. P سیستم خورشیدی پشت بامی Q سیستم خورشیدی پشت بامی i توان اکتیو و راکتیو تولید شده توسط سیستم خورشیدی پشت بامی

است که از طریق اینورترها به گره i متصل می‌شود. P_{LOADi} و Q_{LOADi} مصرف توان اکتیو و راکتیو هستند. $CPLX^P_i$ و ذخیره ساز i توان اکتیو و راکتیو تحویل داده شده توسط ذخیره ساز است.

محدودیت‌های تقاضای ظرفیت میزبانی و امنیتی سیستم عمدتاً از محدودیت‌های عملیاتی سیستم توزیع فعال و محدودیت‌های سازگار با نوسان سیستم خورشیدی پشت بامی تشکیل شده است. محدودیت‌های امنیتی سیستم به شرح زیر بیان می‌شود:

$$(U_i^{\min})^2 \leq U_j^2 \leq (U_i^{\max})^2 \quad (3-45)$$

$$I_{ij}^2 \leq (I_{ij}^{\max})^2 \quad (3-46)$$

جایی که $U_i^{\max}$ و $U_i^{\min}$ حد بالا و پایین دامنه ولتاژ در گره i است. $I_{ij}^{\max}$ حد بالای دامنه جریان خط ij است. برای جلوگیری از تأثیر نوسان توان سیستم توزیع فعال در شبکه فوقانی، محدودیت‌های برق تبادل شده با شبکه فوقانی را به شرح معادلات (۳-۴۷) تا (۳-۴۸) و محدودیت‌های عملیاتی سیستم خورشیدی پشت بامی دارای ضریب قدرت واحد توسط حداکثر حد ظرفیت (S سیستم خورشیدی پشت بامی) از سیستم خورشیدی پشت بامی نصب شده به شرح معادلات (۳-۴۹) تا (۳-۵۰) زیر بیان می‌شود جایی که P سیستم خورشیدی پشت بامی i توان سیستم خورشیدی پشت بامی فعال تزریق شده در گره i است.

$$P_o^{\min} \leq P_{t,o} \leq P_o^{\max} \quad (3-47)$$

$$Q_o^{\min} \leq Q_{t,o} \leq Q_o^{\max} \quad (3-48)$$

$$0 \leq P_i^{DG} \leq S_i^{DG} \quad (3-49)$$

$$\sqrt{(P_i^{DG})^2 + (Q_i^{DG})^2} \leq S_i^{DG} \quad (3-50)$$

همانگونه که یک ذخیره ساز قادر است جریان توان اکتیو بین فیدرهای متصل را کنترل کرده و در شرایط کار عادی توان راکتیو را در ترمینال‌های رابط خود تأمین یا جذب کند. از آنجا که ذخیره ساز می‌تواند توان اکتیو یا راکتیو تغذیه‌کننده که به آن متصل هستند را به طور دقیق کنترل کند، توان اکتیو یا راکتیو دو مبدل به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته می‌شوند. خروجی‌های توان راکتیو دو مبدل به دلیل جداسازی DC از یکدیگر مستقل هستند و باید محدودیت‌های ظرفیت خود را برآورده کنند. براساس سناریوهای عملیاتی معمول، محدودیت‌های توان فعال ذخیره ساز در معادلات (۳-۴) و محدودیت ظرفیت

ذخیره سازدر (۳-۶۵) بیان شد. رابطه بین مکان و ظرفیت یک ذخیره ساز به شرح زیر نشان داده شده است:

$$S_{ij}^{SOP} = m_{ij} s^{module} (1 - \alpha_{ij}) \quad (3-51)$$

جایی که S^{module} حداقل ظرفیت بهینه است، که نشان دهنده ظرفیت ماژول پایه الکترونیکی قدرت که شامل ذخیره ساز است. m_{ij} مقدار تعداد ماژول ها است. مجموع توان راکتیو تزریق شده توسط سیستم خورشیدی پشت بامی و ذخیره ساز به سیستم به ترتیب به شرح زیر بیان می شود:

$$\sum_{i=1}^{N_{DG}} Q_i^{DG} + \sum_{k=1}^{NSOP} (Q_I^{SOP}(k) + Q_J^{SOP}(k)) \leq \sum_{u=1}^{N_n} Q_u^L \quad (3-52)$$

لازم به ذکر است که کل توان راکتیو تزریق شده توسط سیستم فتوولتائیک پشت بامی و ذخیره ساز نباید از کل توان راکتیو تقاضا، که در (۴۵) بیان شده است، فراتر رود تا از جبران بیش از حد سیستم جلوگیری شود و ضریب قدرت در مقادیر تاخیری بالاتر قرار گیرد [۴۲، ۴۳]. علاوه بر این، هیچ جریان معکوس قدرت در سیستم مجاز نیست، همانطور که در (۴۶) بیان شده است. در غیر این صورت، احتیاط های بیشتری باید توسط اپراتورهای شبکه انجام شود تا جریان های معکوس توان بیش از حد و مشکلات ناشی از سطوح بالای نفوذ سیستم خورشیدی پشت بامی را کنترل کند.

$$P_u^L - aP_i^{DG} - bP_i^{SOP} - cP_j^{SOP} \geq 0, \forall i \in N_n \quad (3-53)$$

جایی که a در مورد گره i متصل به واحد سیستم خورشیدی پشت بامی برابر ۱ است. در مورد گره i وصل از طریق فیدر I به ذخیره ساز برابر یک و در مورد گره i وصل از طریق فیدر تغذیه J به ذخیره ساز متصل می شود؛ در غیر این صورت abc برابر صفر است.

متغیرهای بهینه سازی در مدل شامل محل نصب، حالت های کلید و توان فعال و راکتیو منتقل شده ذخیره ساز در هر سناریو است. با معادلات جریان توان AC و محدودیت های عملیاتی منابع انعطاف پذیر مبتنی بر ذخیره ساز، مدل پیشنهادی از نظر ریاضی یک مسئله NLP غیر محدب در مقیاس بزرگ است که نیاز به یک روش حل دقیق و کارآمد.

روش حل

سیستم‌های توزیع دارای کلیدهای مانور (معمولاً بسته) هستند که بخش‌های خط را به هم متصل می‌کنند و کلیدهای معمولاً باز که دو تغذیه‌کننده اصلی، دو باس پست یا جانبی از نوع حلقه را به هم متصل می‌کند. فرض می‌شود که هر خط یک خط جداکننده با یک کلید معمولاً بسته است. علاوه بر این، فرض می‌شود که هر کلید معمولاً باز در هر خط قرار دارد. بنابراین، بازارایی تغییری است که در وضعیت کلیدهای مانور برای اتصال مجدد تغذیه‌کننده‌های توزیع فیدر برای ایجاد یک ساختار شعاعی جدید برای یک هدف عملیاتی خاص بدون نقض شرط ساختار شعاعی رخ می‌دهد.

ابتدا روند حل مفهومی کلی مطابق شکل ۳-۱۲ است. با ورود پاسخ اولیه به فصل مشترک دو مسئله جایابی و ارزیابی ظرفیت میزبانی، بهینه‌سازی انجام شده است و خروجی‌های مختلفی تولید شده که هر بار با تکرار آن خروجی نهایی به دست خواهد آمد.



شکل ۳-۱۲: روند حل مفهومی کلی

در الگوریتم پیش رو مکان نصب و مقدار شاخص به عنوان متغیرهای مستقل مسئله و تابع هدف یا تابع برازندگی انتخاب می‌شوند. پس از آن با استفاده از روال زیر مکان و مقدار بهینه شاخص تعیین می‌شود. در این مطالعه، روش بازارایی برای ایجاد پیکربندی شعاعی احتمالی به شیوه‌ای سریع و کارآمد پیاده‌سازی شده و به شرح زیر روشن می‌شود:

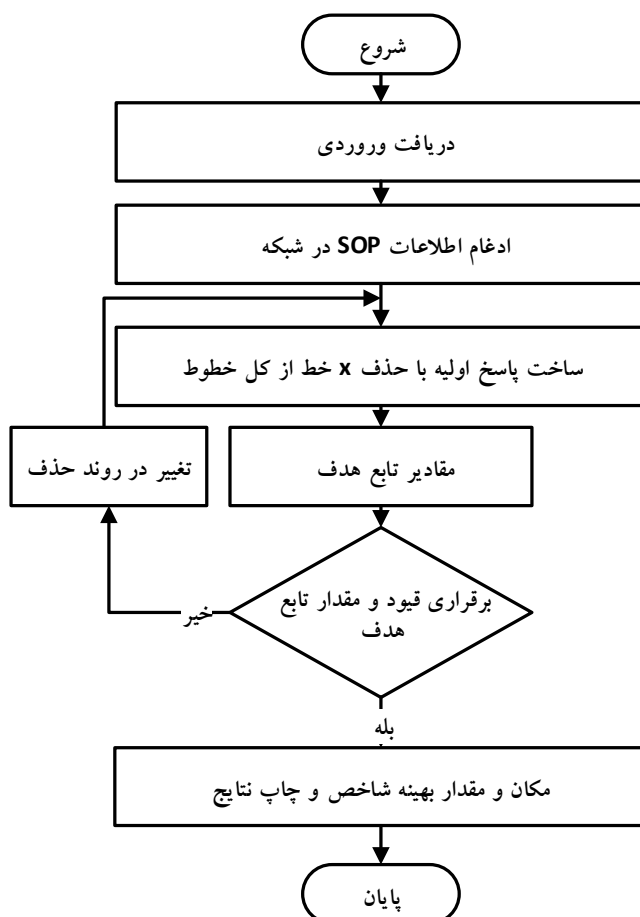
- ❖ مرحله ۱: دریافت ورودی‌ها شامل اطلاعات شبکه، خطوط، باس و همچنین اطلاعات ذخیره ساز از جمله تعداد، ظرفیت و محل نصب اولیه و اطلاعات سیستم خورشیدی پشت بامی اعم از مکان و ظرفیت تولید است.
- ❖ مرحله ۲: ادغام اطلاعات ذخیره ساز در شبکه به این ترتیب که اطلاعات به شبکه اضافه شوند و تعداد خطوط افزایش یابد.

❖ مرحله ۳: ساخت پاسخ اولیه با حذف x خط از کل خطوط یک ساختار شبکه‌ای شعاعی انجام می‌شود تا اعضای جمعیت اولیه تعیین گردند. برای هر یک از متغیرهای مستقل تعریف شده، جمعیت اولیه‌ای تولید می‌شود تا الگوریتم بتواند جستجوی خود را از حالت‌های متنوع آغاز کند. در این مرحله همچنین، حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم نیز مشخص می‌گردد تا فرآیند بهینه‌سازی محدود و قابل کنترل باشد.

❖ مرحله ۴: در هر تکرار از الگوریتم، مقادیر تابع هدف با توجه به مقادیر فعلی ذرات یا متغیرهای مستقل تعریف شده محاسبه می‌شوند. بر اساس این نتایج، مکان بهینه فعلی هر ذره تعیین شده و سپس با بهره‌گیری از آن، بردار سرعت و موقعیت جدید ذرات به‌روزرسانی می‌گردد تا الگوریتم بتواند در فضای جستجو حرکت کرده و به سمت بهینه جهانی یا محلی پیشروی نماید. این فرآیند به صورت تکراری و سیستماتیک ادامه می‌یابد تا شرایط همگرایی برقرار شود و نتایج نهایی حاصل گردد.

❖ مرحله ۵: بررسی قیود و مقدار تابع برازندگی در صورت برقراری قیود و حداکثر شدن تابع هدف به مرحله بعد برو، در غیر به مرحله سوم برو.

❖ مرحله ۶: مقادیر نهایی تابع هدف به همراه نقطه بهینه مکان و مقدار بهینه را چاپ کن.



شکل ۳-۱۳: نمودار روش ارزیابی ظرفیت میزبانی

فصل چهارم - شبیه‌سازی و نتایج

مقدمه

به طور خلاصه مسئله مکان‌یابی بهینه ذخیره ساز در شبکه توزیع برای بهبود ظرفیت میزبانی دارای دو بخش کلی است. بخش اول مربوط به مدل‌سازی و عملکرد ذخیره ساز در سیستم توزیع است. بخش دوم در ارتباط با شاخص مناسب ظرفیت میزبانی بوده که می‌توان آن را به مسئله اضافه نمود. هدف اصلی مسئله افزایش ظرفیت میزبانی در شبکه است. اولین مورد مطابق فصل قبل، تعریف و ترسیم چارچوب ظرفیت میزبانی است. مفهوم ظرفیت میزبانی در حضور منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی معنا پیدا می‌کند و قبل از آن ظرفیت میزبانی مطرح نبود. با ورود منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی به شبکه، تعادل توان تولیدی و مصرفی به هم می‌خورد چون منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی تولید متغیر دارند؛ بنابراین شبکه بایستی ویژگی‌هایی داشته باشد تا بتواند نوسانات را پوشش دهد و این اهمیت ظرفیت میزبانی است.

منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی باید بتوانند حداکثر توان ممکن خود را تولید کنند. مثلاً یک واحد توربین بادی بتواند در هر لحظه هر مقدار توان ممکن که می‌تواند تولید کند؛ یعنی دورریز^۱ توان سیستم فتوولتائیک پشت بامی نداشته باشد. چون کاربرد این منابع رایگان است و سعی می‌شود که از آنها حداکثر توان ممکن تولید شود اما برای این موضوع باید ظرفیت میزبانی شبکه در حد قابل قبولی باشد. این ظرفیت میزبانی می‌تواند توسط ذخیره ساز تامین شود. ذخیره ساز آرایش شبکه را طوری عوض می‌کند که میزان تراکم شبکه حداقل شود؛ بدین ترتیب آن الگوی پخش بار شبکه را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که ظرفیت شبکه برای استفاده توان تولیدی منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی وجود داشته باشد.

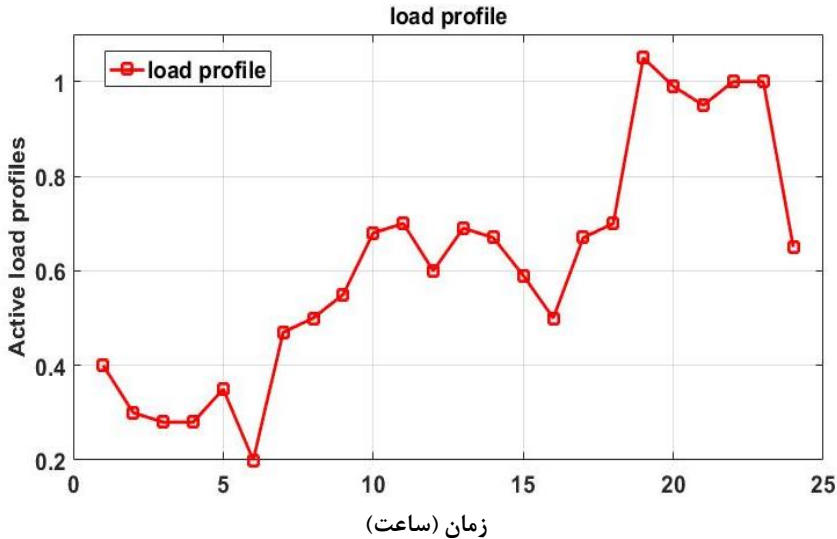
1. Spillage

شاخص ظرفیت میزبانی نیز تراکم در نظر گرفته شد. شبکه به شرطی انعطاف‌پذیر است که تراکم آن حداقل شود؛ بدین ترتیب شبکه‌ای که میزان تراکم خطوط آن به کمترین میزان خود باشد، بیشترین ظرفیت میزبانی را دارد. طبیعی است وقتی ظرفیت خالی در شبکه وجود داشته باشد می‌توان هر چقدر در شبکه توان جا به جا کرد. مشکل فعلی زیرساخت شبکه به مرز پر شدگی ظرفیت رسیده و نیروگاه‌هایی تولید کافی دارند ولی نمی‌توانند انتقال دهند، یعنی ظرفیت میزبانی کم شده است.

طبق توضیحات و تعریف ظرفیت میزبانی ارائه شده در قبل، شبکه‌ای دارای ظرفیت میزبانی بیشتری است که تراکم آن حداقل باشد. تراکم کم یعنی که شبکه این ظرفیت میزبانی را دارد که بتواند از منابعش به حد کافی استفاده کند. در فصل سوم پس از معرفی تابع و قیود حاکم بر مسئله چگونگی انجام الگوریتم بیان شد. در این فصل شبکه نمونه استاندارد بررسی شده و به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود.

مطالعات موردی و تجزیه و تحلیل

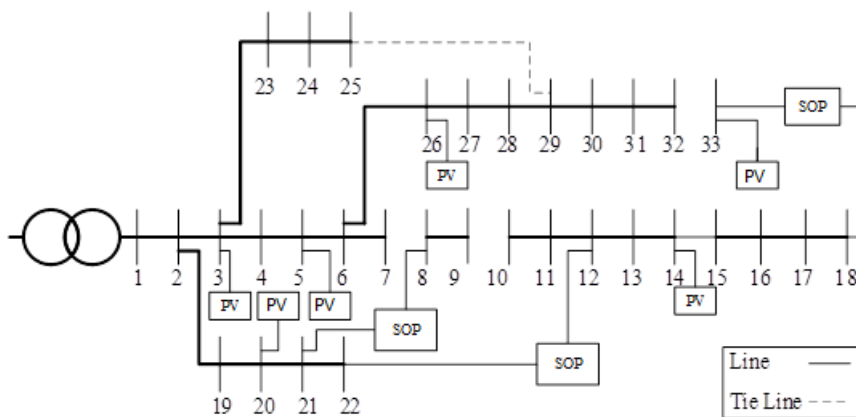
در این بخش، سیستم استاندارد ۳۳ گره IEEE برای نشان دادن اثربخشی و کارایی روش پیشنهادی و مدل ارزیابی ظرفیت میزبانی در سناریوهای مختلف استفاده می‌شود. علاوه بر این، تلفات ذخیره ساز در سیستم در نظر گرفته شده است. ابتدا، بهبود ظرفیت میزبانی بر اساس ذخیره ساز بر روی سیستم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی در این مطالعه با نرم افزار GAMS پیاده‌سازی شده و توسط الگوریتم CPLEX حل شده است. مطالعات موردی بر روی رایانه با پردازنده IntelCorei7 نسل دوم، با سرعت ۲/۲ گیگاهرتز انجام شده است. پروفیل بار شبکه توزیع استفاده شده در ۲۴ ساعت در شکل (۴-۱) نشان داده شده که برای اجرای مدل پیشنهادی برای مدیریت ذخیره ساز بکار می‌رود.



شکل ۴-۱. پروفیل بار روزانه شبکه توزیع پیشنهادی.

سیستم ۳۳ گره IEEE

سیستم توزیع ۳۳ گره IEEE با ۳۲ خط و ۵ خط معمولاً باز در شکل ۴-۲ نشان داده شده است که سطح ولتاژ آن $12/66 \text{ Kv}$ است. مجموع بارهای اکتیو و راکتیو سیستم به ترتیب 3715 Kw و 2300 KVAR است. داده‌های شبکه مطابق [۴۹] ارائه شده است. سیستم ۳۳ گره IEEE به طور گسترده برای تأیید و نشان دادن انواع روش‌ها و الگوریتم‌های توسعه یافته برای برنامه‌ریزی و عملکرد شبکه‌های توزیع ولتاژ متوسط استفاده می‌شود. محدوده پایین و بالای ولتاژ سیستم $0/95$ و $1/05$ پریونیت با توجه به انحراف برابر است.



شکل ۴-۲: سیستم توزیع ۳۳ گره IEEE

برای در نظر گرفتن تأثیر منابع انعطاف‌پذیر مبتنی بر ذخیره ساز بر ظرفیت میزبانی سیستم، پارامترهای اساسی منابع انعطاف‌پذیر یکپارچه به شرح زیر نشان داده شده است. تعداد ذخیره‌سازهایی که می‌توان در شبکه نصب کرد بین یک تا پنج واحد است. که در آن فرض می‌شود که ظرفیت ذخیره ساز برابر یک KVA بوده و ضریب تلفات ذخیره ساز برابر $0.2/30$ و جهت تزریق توان به گره مثبت است. مکان‌های اولیه نصب ذخیره ساز خطوط انتهایی شبکه است.

اغلب در شبکه‌های توزیع، شاخه‌های نزدیک به پست محدودیت جریان بیشتری نسبت به ایستگاه‌های فرعی دارند. بر این اساس، جدول ۴-۱ محدوده جریان شاخه‌ها را فهرست می‌کند [۳۸].

جدول ۴-۱: محدوده جریان شاخه

جریان شاخه در عملکرد عادی A	جریان نامی شاخه A
< 50	۱۰۰
۱۲۰-۵۰	۲۰۰
۲۵۰-۱۲۰	۴۰۰
۲۵۰-۶۰۰	۸۰۰
≥ 600	۱۲۰۰

به منظور بررسی ظرفیت میزبانی در حضور منابع تولید پراکنده، به ترتیب شش واحد سلول فتوولتائیک پشت بامی در شبکه توزیع ادغام شده‌اند. پارامترهای اصلی پیکربندی و

مکان نصب تولیدات پراکنده در جدول ۴-۲ نشان داده شده است. همه تولیدات پراکنده اعم از واحدهای بادی و خورشیدی با ضریب توان واحد کار می‌کنند.

جدول ۴-۲: قابلیت‌های نصب سیستم خورشیدی پشت بامی

پارامترها	PV					
مکان نصب (باس)	۵	۲۰	۳	۱۴	۳۰	۲۶
ظرفیت نصب (Kw)	۴۰۰	۴۵۰	۴۳۰	۳۵۰	۴۰۰	۳۷۰

حداکثر درجه توان ایستگاه فتوولتائیک خورشیدی با در نظر گرفتن کل توانهای خورشیدی محاسبه شده با استفاده از معادله (۳-۱۳) ثابت می‌شود. حداکثر درجه در این مطالعه، حداکثر ظرفیت برای سیستم فتوولتائیک پشت بامی به ترتیب از متوسط توان برآورد شده با تابش محاسبه می‌شود. داده‌های تابش خورشید در طول ۲۴ ساعت مطابق [۵۰، ۵۱] است. توان تولید شده برای هر سطح تابش را به ترتیب با استفاده از معادلات (۳-۱۵) و (۳-۱۷) محاسبه می‌شود. در این مطالعه متوسط توان تولید شده توسط خورشیدی ۱/۱۲ پریونیت است.

از آنجا که در یک شبکه عملی همواره تغییرات بار وجود دارد که در فصول مختلف بر بازآرایی شبکه تاثیرگذار می‌باشد. لذا بایستی در مطالعات تجدید پیکربندی تغییرات بار الکتریکی را در نظر گرفت. از این رو تغییرات بار کل شبکه مطابق جدول (۴-۴) به سه دوره زمانی تقسیم‌بندی می‌شود. پس از آن بار بر روی هر یک از باسها توزیع می‌گردد.

جدول ۴-۴: تغییرات بار

دوره زمانی	نوع بارگزاری	میزان بارگزاری (%)
۱	سبک	۵۰
۲	متوسط	۱۰۰
۳	سنگین	۱۶۰

کلید باز شبکه بین شین‌های ۲۵-۲۹، ۱۸-۳۳، ۱۲-۲۲، ۹-۱۵، ۸-۲۱ می‌باشند. به منظور بررسی تاثیر ذخیره ساز در شبکه توزیع بر بهبود توابع هدف ذکر شده در بخش ۳-۸، برای تعیین مکان بهینه نصب ذخیره سازها در سیستم دو سناریو در نظر گرفته شده است.

- سناریو اول: شبکه توزیع در حضور منابع سیستم خورشیدی پشت بامی و بدون حضور ذخیره ساز
- سناریو دوم: شبکه توزیع در حضور منابع سیستم خورشیدی پشت بامی و ذخیره ساز

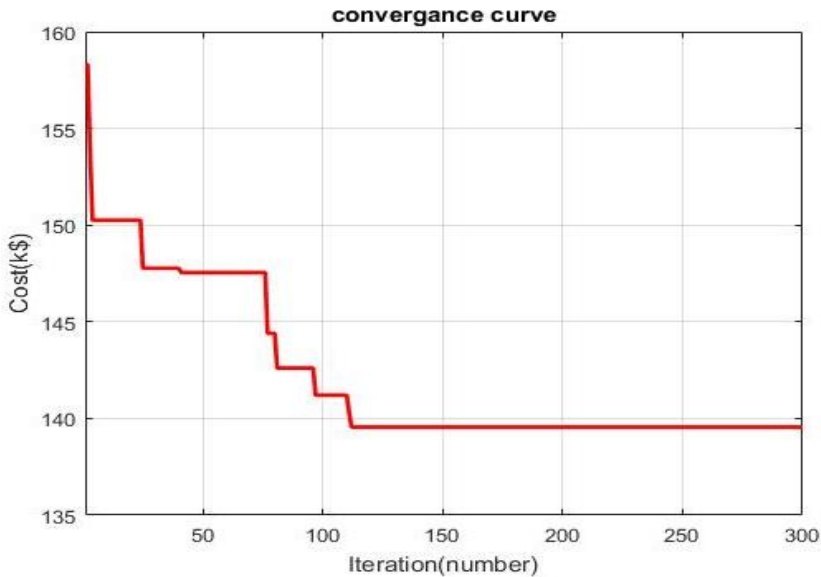
شبیه‌سازی

در شروع تعداد شاخه‌ها، باس‌ها، مشخصات اولیه و تعداد تکرار مشخص می‌شوند. تعداد پارامترهای موجود برابر تعداد ذخیره ساز است. سپس الگوریتم با تولید جمعیت و به روزرسانی، مقادیر بهینه مکان و شاخص را پیدا می‌کند. از کل شاخه باید ۳۲ تا شاخه وصل و بقیه قطع باشند (که قید شعاعی بودن از بین نرود). سپس الگوریتم به این تعداد، خط را خارج می‌کند و به ازای این تعداد خط جدید اضافه کرده به نحوی که شاخص ظرفیت میزبانی حداکثر شود. نتایج به صورت شناسایی خطوطی ارائه می‌شوند که باید از شبکه حذف گردند. پس از این مرحله، با اجرای فرآیند پخش بار، توان عبوری نهایی خطوط به دست می‌آید و وضعیت شبکه پس از حذف خطوط مورد نظر مشخص می‌شود. علاوه بر این، روند بهینه‌سازی تابع هدف در شکل ۴-۳ نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تابع هدف پس از ۱۰۰ تکرار به مقدار حداقل خود رسیده و الگوریتم به همگرایی مطلوب دست یافته است. این نتایج نشان‌دهنده کارایی الگوریتم در پیشبرد فرآیند بهینه‌سازی و دستیابی به پاسخ بهینه برای مسئله مورد بررسی می‌باشند.

مطابق با توضیحات ارائه‌شده در فصل پیشین، در این پایان‌نامه از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (CPSO) به منظور بهینه‌سازی تابع هدف تعریف‌شده برای مسئله جانمایی و تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها استفاده شده است. در این مطالعه، فرض مسئله بر قراردعی پنج ذخیره‌ساز بوده و هدف، تعیین مکان و اندازه بهینه آن‌ها با رعایت روش‌شناسی تشریح‌شده می‌باشد.

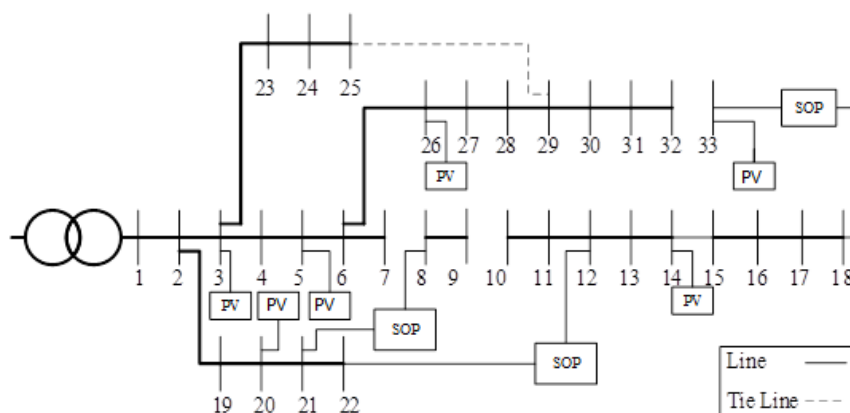
برای اجرای شبیه‌سازی روش پیشنهادی، از محیط نرم‌افزاری GAMS بهره گرفته شده است. منحنی همگرایی الگوریتم برای تابع هدف مسئله در شکل ۴-۳ ارائه شده است؛ همان‌طور که ملاحظه می‌شود، الگوریتم پیشنهادی در کمترین زمان ممکن به سمت پاسخ بهینه حرکت کرده و فرآیند همگرایی با سرعت بالایی تکمیل شده است.

این نتایج مؤید کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی است که با استفاده همزمان از دو موتور جستجوگر بهینه محلی و سراسری حاصل گردیده است. به علاوه، این مسئله نشان‌دهنده توانایی الگوریتم در دستیابی به بهینگی و سرعت عمل بالا در راستای ارتقای انعطاف‌پذیری شبکه‌های توزیع برق تحت شرایط بحرانی می‌باشد.



شکل ۴-۳: نمودار همگرایی

در این مطالعه تعیین مکان بهینه ذخیره ساز توسط الگوریتم پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. مکان‌های بهینه قرارگیری ذخیره سازها به ترتیب در خطوط ۱۲، ۱۸، ۲۱ طبق شکل ۴-۳ نشان داده شده است. همچنین ظرفیت بهینه آنها نیز در جدول ۴-۵ ارائه شده است. مقادیر توابع هدف در نظر گرفته در مساله جایابی ذخیره ساز نیز در جدول ۴-۶ داده شده است. شایان ذکر است که هزینه تراکم بصورت تفاضل قیمت های گرهی بین دو سر خط در توان عبوری از آن خط محاسبه میشود.



شکل ۴-۳: ساختار شبکه پس از مکان یابی

جدول ۴-۵: نتایج جایابی و ظرفیت یابی ذخیره ساز

شماره	مکان	ظرفیت (MW)
۱	۱۸	۳۰۰
۲	۲۱	۲۵۰
۳	۱۲	۴۵۰

جدول ۴-۶: مقادیر توابع هدف مساله جایابی ذخیره ساز

توابع	مقادیر (\$)
هزینه های طراحی	۸۷۶۵۲/۴۵
هزینه های تعمیر و نگهداری	۲۳۱۸۸/۹۰
هزینه تلفات شبکه	۱۷۵۴۲/۶۶
هزینه تراکم خطوط	۱۱۸۹۴/۷۳

استراتژی‌های عملیاتی منابع انعطاف‌پذیر مبتنی بر ذخیره ساز در هر سناریو از شکل‌ها نشان داده شده است. نتایج ارزیابی ظرفیت میزبانی دو سناریو در جدول ۴-۵ آمده است. با تنظیم مداوم و سریع جریان توان اکتیو و راکتیو بر اساس ذخیره ساز، شاخص ظرفیت میزبانی در سناریو آخر در مقایسه با موارد دیگر افزایش می‌یابد. منابع مبتنی بر ذخیره ساز حداکثر ظرفیت میزبانی را در عین حفظ عملکرد ایمن شبکه‌های توزیع الکتریکی فعال افزایش می‌دهند. از این رو طبق [۲۸]، می‌توان نتیجه گرفت که استراتژی‌های بازآرایی و تخصیص سیستم خورشیدی پشت بامی به طور جداگانه و تخصیص همزمان بازآرایی و سیستم

خورشیدی پشت بامی نمی توانند سطح عملکرد قابل قبول سیستم را با تغییر بار تضمین کنند.

از یک سو، نتایج بدست آمده با سیستم خورشیدی پشت بامی نصب شده در سیستم در صورت عدم اتصال ذخیره ساز عملکرد ضعیفی را نشان می دهد؛ که می تواند با عدم وجود راه حل قابل قبول برای مشکل نقض حداقل مقدار ولتاژ و شاخص های دیگر توضیح داده شود؛ در شرایط عادی و سنگین بارگذاری همانطور که در سناریوهای پایه و یک نشان داده شده است. بنابراین، برای برآوردن حداقل ولتاژ مورد نیاز و شاخص های دیگر باید با نصب ذخیره ساز همانطور که در سناریو دو ارائه شده، عملکرد سیستم جبران شود.

جدول ۴-۵: نتایج برای سیستم ۳۳ باسه توزیع

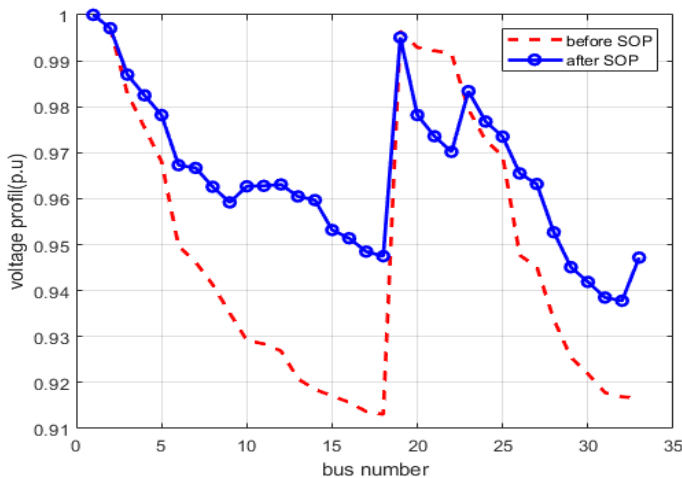
سناریو	سیستم خورشیدی پشت بامی Level (%)	load level 50 %			load level 100 %			load level 160%		
		P _{LOSS} (Kw)	FEI (%)	ADVI (Pu)	P _{LOSS} (Kw)	FEI (%)	ADVI (Pu)	P _{LOSS} (Kw)	FEI (%)	ADVI (Pu)
۰	۰	۱۰۶/۲۴	۶۸/۰۲	۰/۰۵۴	۲۰۹/۹۱	۶۴/۶۰	۱/۷۹۶۶	۳۴۸/۲	۵۸/۹۵	۰/۰۴۲
۱	۱۰	۱۰۲/۱۷	۶۷/۱۲	۰/۰۴۹	۱۹۰	۶۶/۲۹	۱/۳۰	۳۲۲/۵	۶۱/۲۲	۰/۰۳۸
	۵۰	۹۲/۲۲	۷۰/۵۳	۰/۰۴۱	۱۶۴/۲۲	۶۸	۱/۲۹	۳۰۱/۴۵	۶۳/۴۵	۰/۰۳۳
	۱۰۰	۸۳/۴۶	۷۲/۰۴	۰/۰۳۵	۱۳۵/۸۴	۷۴/۹۷	۱/۷۰۰۹	۲۴۶/۱۲	۷۴/۴۴	۰/۰۲۵
۲	۱۰	۵۲/۲۸	۷۴/۲۲	۰/۰۶۲	۷۴/۶۲	۷۴/۴۹	۱/۲۸	۲۹۰/۷۳	۵۹/۲۱	۰/۰۴۱
	۵۰	۳۴/۴۲	۸۰/۴۳	۰/۰۵۱	۷۲/۲۸	۷۶/۲	۱/۲۴	۲۸۹/۸۰	۶۵/۶۴	۰/۰۳۵
	۱۰۰	۲۷/۳۷	۸۹/۷۴	۰/۰۴۳	۶۱/۴۰	۸۱/۵۳	۱/۱۴۷۳	۲۷۵/۱۴	۶۹/۲۳	۰/۰۳۳

به طور خلاصه، نتایج به دست آمده برای سناریو دو (تخصیص سیستم خورشیدی پشت بامی و ذخیره ساز) منجر به بهترین راه حل شد که در جدول ۴-۵ با ذخیره ساز در سطح بارگذاری معمولی و سنگین و سبک نشان داده شده است. در مقایسه با نتایج به دست آمده از سناریوهای دیگر، در حضور منابع سیستم خورشیدی پشت بامی و ذخیره ساز مقادیر عملکردی سیستم مربوطه بهبود می یابد. بدین ترتیب در مقایسه با نتایج به دست آمده از سناریوهای دیگر، تلفات توان در حالت عادی ۵۴/۸۰، در بارهای سبک ۶۷/۲۰ و در بارهای سنگین ۴۳ درصد با توجه به مقادیر سیستم پایه مربوطه کاهش می یابد. همچنین در مقایسه با نتایج به دست آمده از سناریوهای دیگر، شاخص ظرفیت میزبانی در حالت عادی ۲۷/۲۰،

در بارهای سبک ۲۴/۵۶ و در بارهای سنگین ۳۷/۳۷ با توجه به مقادیر سیستم پایه مربوطه کاهش می‌یابد.

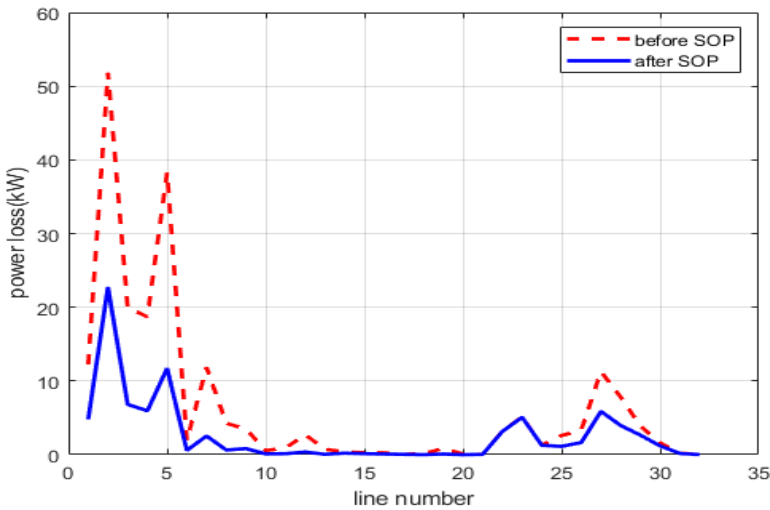
صرف نظر از جنبه‌های اقتصادی در سناریوهای ذخیره ساز بدون تلفات، سیستم با افزایش تعداد ذخیره سازهای نصب شده به دلیل کاهش قابل توجه اتلاف توان، کارآمدتر می‌شود. با این حال اگر تلفات داخلی ذخیره ساز در نظر گرفته شود، این امر صادق نیست، زیرا حداقل تلفات توان به طور قابل توجهی تحت تأثیر تلفات داخلی ذخیره ساز قرار می‌گیرد. این روشن می‌سازد که با نصب ذخیره سازهای بیشتر، حداقل تلفات تضمین نمی‌شود. علاوه بر این، نمی‌توان به سادگی تصور کرد که افزایش تعداد ذخیره سازهای نصب شده، به طور نسبی تلفات داخلی ذخیره ساز را افزایش می‌دهد، زیرا این بستگی به توان منتقل شده توسط ذخیره ساز و همچنین مکان‌های ذخیره ساز دارد. در نهایت، بهینه‌سازی استراتژی تخصیص سیستم خورشیدی پشت بامی و ذخیره ساز به صورت جمعی به دستیابی به بهترین سطح عملکرد سیستم کمک می‌کند.

بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه از جمله موارد دیگری است که بررسی شده است. پروفیل ولتاژ شبکه در حالت به کارگیری و عدم به کارگیری ذخیره ساز در شکل ۴-۴ رسم شده است که نشان می‌دهد با استفاده از ذخیره ساز ولتاژ شین‌ها به مقدار استاندارد یک پریونیت نزدیک تر می‌شوند.



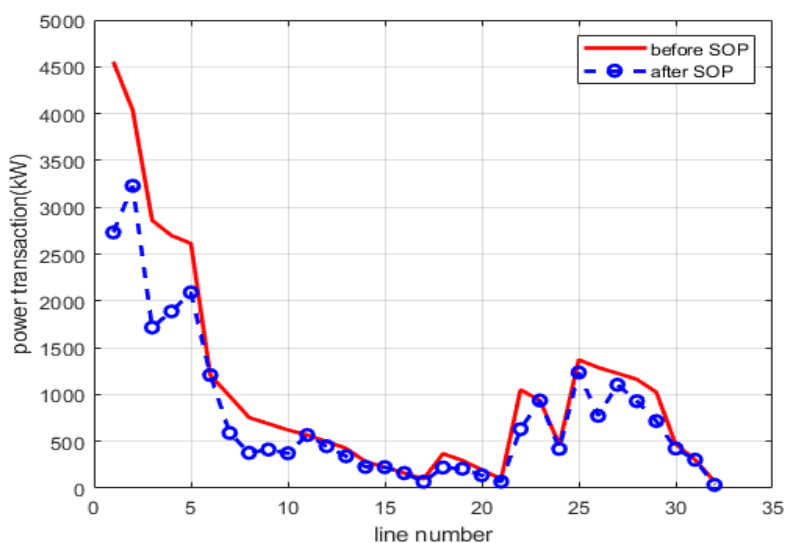
شکل ۴-۴: پروفیل ولتاژ در شبکه ۳۳ باسه

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که با استفاده از ذخیره ساز در شبکه مورد مطالعه تلفات توان اکتیو به میزان ۵۴ درصد کاهش پیدا کرده است. جزئیات تلفات توان اکتیو بر اساس ذخیره سازهای استفاده شده در شکل ۴-۵ آمده است. دلیل این مساله این است که ذخیره ساز با تزریق توان در محل مصرف باعث کاهش جریان عبوری از خطوط میشود که این امر به نوبه خود باعث کاهش تلفات و هم چنین بهبود پروفیل ولتاژ شبکه میشود.



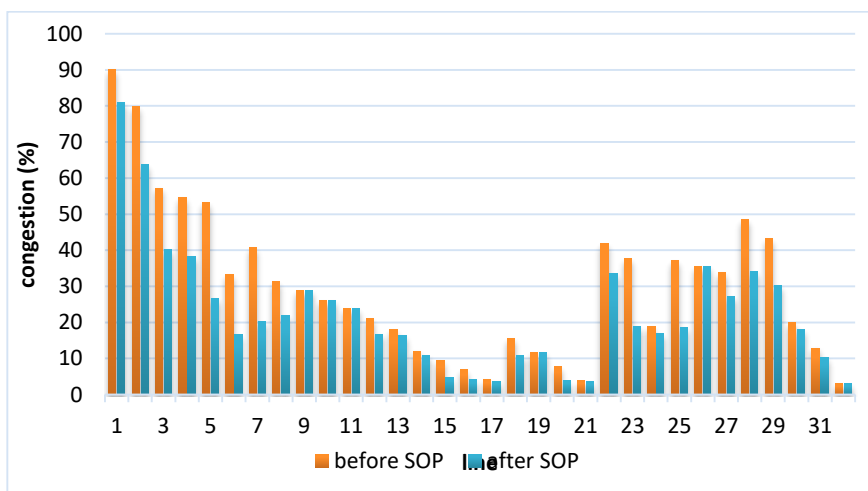
شکل ۴-۵: تلفات در شبکه ۳۳ باسه توان شبکه

شکل ۴-۶ توان عبوری از خطوط را برای دو سناریو نشان می‌دهد. طبق شکل خطوطی که توان زیادی از آنها عبور می‌کرده اکنون پس از اجرای ذخیره ساز شاخص ظرفیت میزبانی بهبود یافته است.



شکل ۴-۶: توان انتقالی خطوط.

با به کارگیری ذخیره ساز در مکان‌های بهینه شاخص به مقدار ۲۷ درصد کاهش پیدا کرده که جزئیات آن بر اساس ذخیره سازهای استفاده شده در جدول ۴-۸ آمده است.



شکل ۴-۷: توان انتقالی خطوط

از آنجا که شرایط بارگیری فیدر به دلیل نفوذ زیاد سیستم خورشیدی پشت بامی تشدید می‌شود، منابع مبتنی بر ذخیره ساز به طور موثر بار جاری را در محدوده حرارتی از طریق تنظیم جریان قدرت در جنبه‌های مکانی و زمانی حفظ می‌کنند. موقعیت و اندازه مطلوب ذخیره ساز نیز مسئله مهمی است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در مهندسی، داده‌های اندازه گیری شبکه‌های توزیع فعال جمع آوری شده و به سیستم مدیریت توزیع منتقل می‌شود و مشخصات خروجی و محدوده عدم قطعیت سیستم خورشیدی پشت بامی‌ها را پیش بینی می‌کند. سپس، با توجه به حداکثر ظرفیت میزبانی سیستم خورشیدی پشت بامی، ارزیابی ظرفیت میزبانی کمی ادغام ذخیره ساز توسط سیستم مدیریت توزیع بر اساس اطلاعات به دست آمده انجام می‌شود. بر اساس نتایج ارزیابی، سیستم مدیریت توزیع می‌تواند محل نفوذ سیستم خورشیدی پشت بامی را تعیین کند، در حالی که عملکرد ایمن شبکه‌های توزیع فعال را حفظ می‌کند. تجزیه و تحلیل فوق نشان می‌دهد که با ارائه ظرفیت میزبانی عملیاتی در جنبه‌های مکانی و زمانی، منابع انعطاف پذیر مبتنی بر ذخیره ساز به طور قابل توجهی ظرفیت میزبانی و نفوذ سیستم خورشیدی پشت بامی در شبکه‌های توزیع فعال را افزایش می‌دهد.

جدول ۴-۶ نتایج شبیه سازی سیستم بعد از قراردادی ذخیره ساز

مقادیر	توابع
kW۱۴۷/۲۵	تلفات حقیقی شبکه
kVAR۹۸/۳۵	تلفات موهومی شبکه
۷/۱۶۵	میزان تراکم سیستم
۲۷/۱۶۶	شاخص نامتعادلی ولتاژ
kWh۲۵۶/۳۷	میزان انرژی تأمین نشده سیستم

جدول (۴-۶) نتایج کلی شبیه‌سازی پس از جاگذاری ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد. با مقایسه این نتایج با داده‌های پیشین، مشاهده می‌شود که عملکرد سیستم به‌طور چشمگیری بهبود یافته است. به عنوان نمونه، میزان تلفات اکتیو و راکتیو شبکه به ترتیب ۸۷,۳۲٪ و ۴۲,۸۵٪ کاهش یافته‌اند؛ این امر نشان می‌دهد که با توزیع توان در سطح شبکه، میزان توان عبوری از خطوط کاهش یافته و در نتیجه تلفات خطوط کاهش یافته است. همچنین، شاخص انعطاف‌پذیری شبکه با کاهش ۲۶,۴۲٪ همراه بوده که نشان‌دهنده کاهش میزان قطعی بار و

افزایش قابلیت اطمینان شبکه نسبت به حالت پیشین می‌باشد. در نهایت، میزان انرژی تأمین‌نشده در حضور ذخیره‌سازها نسبت به حالت عدم حضور آن‌ها ۲۲۲,۰۳ کیلووات ساعت کاهش یافته است که معادل کاهش ۴۶,۵۲٪ می‌باشد. این کاهش ناشی از وجود ظرفیت پشتیبان ذخیره‌ساز در فیدرهای شعاعی شبکه است، به‌گونه‌ای که در صورت وقوع خطا، بخشی از بارهای حیاتی شبکه تأمین می‌شوند.

در بخش قبلی، شبیه‌سازی‌ها با فرض نصب چهار ذخیره‌ساز و پروفیل متوسط شبکه در حضور منابع تولید پراکنده انجام شده بود. برای بررسی تأثیر ظرفیت نصب شده ذخیره‌سازها بر پارامترهای کلیدی مسئله، در این بخش یک تحلیل جامع انجام شده است. به این منظور، تأثیر ذخیره‌ساز بر بار اوج سیستم توزیع برای ضرایب نفوذ مختلف (از یک پریونیت تا صفر) و در گام‌های مختلف تحلیل شده است.

جدول (۴-۷) نتایج مربوط به پارامترهای مهم شبکه برای ضرایب نفوذ مختلف ذخیره‌ساز در حضور منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد. همچنین، جدول (۴-۸) این نتایج را در غیاب منابع تولید پراکنده ارائه می‌کند. مطابق با جدول (۴-۷)، مشاهده می‌شود که با افزایش ظرفیت نصب شده ذخیره‌سازها، شاخص‌های فنی سیستم بهبود می‌یابند، اما این بهبود با افزایش هزینه‌های طراحی شبکه همراه است. از این رو، لازم است توازن بین ارتقای ویژگی‌های فنی و منافع اقتصادی برقرار شود. با در نظر گرفتن ضرایب نفوذ مختلف ذخیره‌سازها، می‌توان توابع و پارامترهای کلیدی سیستم را مطابق جدول‌های ارائه شده محاسبه نمود.

جدول ۴-۷ پارامترهای شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده با ضرایب نفوذ مختلف ذخیره‌سازها

مشخصات سیستم توزیع				ضریب نفوذ ذخیره ساز
توان مصرفی کل (MW)	تلفات شبکه (kW)	درصد افت ولتاژ (%)	نامتعادلی ولتاژ (%)	
۱/۵۵۲	۳۹/۰۱۷	۸/۰۵۲	۱/۲۱۶	۰/۱
۱/۸۴۸	۵۴/۹۱۶	۹/۷۰۷	۱/۴۲۴	۰/۳
۱/۹۴۰	۶۰/۲۰۹	۱۰/۰۶۵	۱/۴۶۶	۰/۴
۲/۰۷۳	۶۸/۷۵۸	۱۰/۸۶۲	۱/۳۸۷	۰/۵
۲/۱۳	۷۲/۷۴۱	۱۱/۰۸۶۸	۱/۵۶۱	۰/۶
۲/۲۰۵	۷۷/۳۵۷	۱۱/۵۲۱	۱/۶۸۱	۰/۷
۲/۳۲۱	۸۵/۳۱۹	۱۲/۰۸	۱/۸۲۹	۰/۸

مشخصات سیستم توزیع				ضریب نفوذ ذخیره ساز
توان مصرفی کل (MW)	تلفات شبکه (kW)	درصد افت ولتاژ (%)	نامتعادلی ولتاژ (%)	
۲/۴۰۶	۹۳/۶۷۴	۱۲/۶۵۸	۱/۸۵۳	۰/۹
۲/۵۲۸	۱۰۰/۲۸۲	۱۳/۱۰۱	۱/۹۷۵	۱

جدول ۸-۰ پارامترهای شبکه توزیع بدون حضور منابع تولید پراکنده و ضرایب نفوذ متفاوت ذخیره ساز

مشخصات سیستم توزیع				ضریب نفوذ ذخیره ساز
توان مصرفی کل (MW)	تلفات شبکه (kW)	درصد افت ولتاژ (%)	نامتعادلی ولتاژ (%)	
۱/۶۷۷	۴۵/۱۴۶	۸/۶۱۰	۱/۳۳۱	۰/۰
۱/۹۹۵	۶۴/۵۷۰	۱۰/۴۴۲	۱/۵۶۵	۰/۳
۲/۱۰۸	۷۱/۲۱۸	۱۱/۱۵۲	۱/۷۵۰	۰/۴
۲/۲۰۰	۷۶/۰۳۴	۱۱/۲۷۶	۱/۶۶۸	۰/۵
۲/۲۷۸	۸۲/۱۳۳	۱۱/۹۶۰	۱/۷۹۱	۰/۶
۲/۱۸۵	۹۱/۶۶۱	۱۲/۴۷۸	۱/۹۲۳	۰/۷
۲/۴۹۰	۹۹/۱۸۰	۱۳/۰۳۴	۱/۹۱۱	۰/۸
۲/۷۵۷	۱۰۴/۲۹۶	۱۳/۲۷۰	۱/۹۴۲	۰/۹
۲/۱۰۰	۱۱۱/۷۰۹	۱۳/۸۳۵	۲/۰۲۲	۱

بر اساس نتایج حاصل، مشخص شد که نصب ذخیره‌سازها و ادغام شاخص‌های پیشنهادی در ریزشبکه منجر به کاهش پیک‌بار سیستم در ساعات اوج مصرف می‌شود. این کاهش نه تنها به اصلاح پیک‌بار شبکه کمک می‌کند، بلکه باعث به تعویق افتادن توسعه پست‌های توزیع شده و نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد شبکه و کاهش نیاز به سرمایه‌گذاری‌های اضافی ایفا می‌نماید.

علاوه بر این، با تحلیل نتایج مشاهده می‌شود که در صورت اعمال شاخص‌های پیشنهادی، پروفیل توان خریداری شده نسبت به حالتی که تنها ذخیره‌سازها در شبکه مدنظر قرار گرفته‌اند، بهبود قابل توجهی یافته است. این بهبود، از منظر امکان‌سنجی اقتصادی برای شرکت توزیع، منافع فنی و اقتصادی قابل توجهی را فراهم می‌آورد. در این حالت، انعطاف‌پذیری سیستم به صورت چشمگیر افزایش یافته و مسیرهای اضافی که توسط

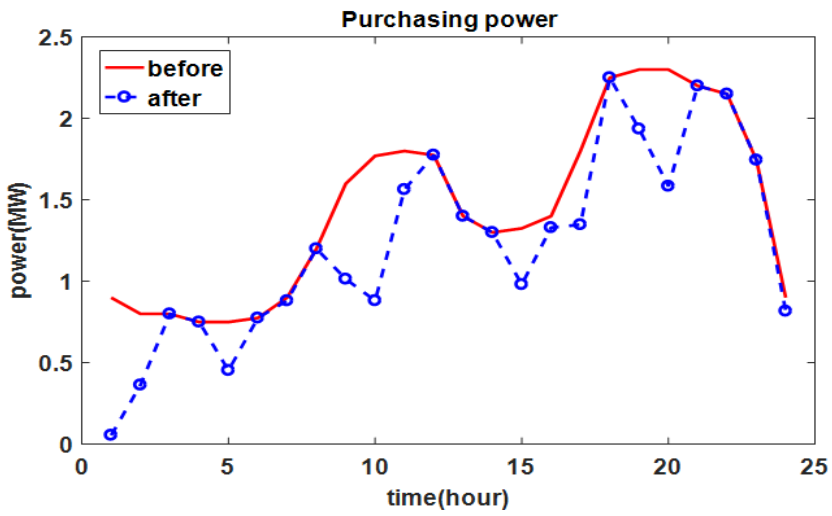
ذخیره‌سازها در شبکه ایجاد می‌شوند، باعث توزیع مؤثر توان، کاهش تراکم خطوط و ارتقای قابلیت اطمینان شبکه می‌گردند.

به طور کلی، ترکیب استفاده از ذخیره‌سازها و شاخص‌های بهینه پیشنهادی، ضمن ارتقای عملکرد فنی شبکه توزیع، زمینه را برای بهبود اقتصادی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه در شرایط بحرانی فراهم می‌کند.

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که پروفیل توان خریداری شده هنگامی که ذخیره‌سازها و شاخص‌های پیشنهادی همزمان در شبکه لحاظ شده‌اند، نسبت به حالتی که تنها ذخیره‌سازها یا فقط شاخص‌های پیشنهادی در شبکه مدنظر قرار گرفته‌اند، بهبود چشمگیری دارد. علاوه بر این، زمانی که ذخیره‌سازها در شبکه لحاظ می‌شوند، پروفیل توان نسبت به حالتی که تنها شاخص‌های پیشنهادی اعمال شده‌اند نیز بهبود یافته است.

نتایج کلی مربوط به شاخص پیشنهادی برای سنجش انعطاف‌پذیری شبکه در حضور و غیاب ذخیره‌سازها ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هنگامی که ذخیره‌سازها در سیستم حضور دارند، مقدار شاخص به حداقل خود رسیده است؛ این امر نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری شبکه در بیشترین میزان خود قرار دارد. دلیل این بهبود، افزایش ظرفیت پشتیبان برای بارهای حساس و کاهش تراکم شبکه توسط ذخیره‌سازها در شرایط مختلف بهره‌برداری است، که امکان توزیع توان مؤثرتر و افزایش قابلیت اطمینان شبکه را فراهم می‌کند.

شکل ۴-۸ توان خریداری شده از شبکه بالادست را قبل و بعد نصب ذخیره ساز در بازه بهره برداری ۲۴ ساعته شبکه به تصویر میکشد. همان‌طور که دیده میشود بعد نصب ذخیره ساز میزان توان خریداری شده به ویژه در ساعات پیک سیستم کاهش داشته که ناشی از تزریق توان به فیدرهای مهم شبکه جهت جلوگیری از وقوع تراکم می باشد. این مساله باعث میشود میزان استفاده از منابع تولید پراکنده به خصوص منابع سیستم فتوولتائیک پشت بامی افزایش یابد.



شکل ۴-۸: توان مبادله شده با شبکه بالادست قبل وبعد نصب ذخیره ساز

فصل پنجم - جمع‌بندی و افق‌های پیش‌رو در توسعه شبکه‌های توزیع فعال

در این مطالعه، یک چارچوب برای تعیین محل‌های بهینه نصب ذخیره‌ساز با در نظر گرفتن تغییرات توپولوژی شبکه و همچنین تحلیل چندسناریویی از پیکربندی بهینه شبکه‌های توزیع مجهز به ذخیره‌ساز ارائه شده است. در این راستا، از الگوریتم پخش بار پسر-پیشرو به همراه مدل تزریق توان ذخیره‌ساز برای دستیابی به پاسخ بهینه مسئله استفاده گردید. همچنین، برای حل مسئله تخصیص ذخیره‌ساز در کنار بازآرایی شبکه و سامانه‌های فتوولتائیک پشت‌بامی تحت شرایط بارگذاری مختلف، از حل گر CPLEX بهره گرفته شد؛ به گونه‌ای که کاهش شاخص ظرفیت میزبانی و بهبود عملکرد کلی شبکه، از جمله کاهش تلفات توان در شبکه‌های توزیع متعادل، مدنظر قرار گرفت.

علاوه بر این، روش بازآرایی برای دستیابی به پیکربندی شعاعی در شبکه توزیع استاندارد IEEE 33 گره متعادل پیشنهاد شد و چندین سناریوی عملیاتی مورد بررسی قرار گرفت تا راه‌حل بهینه‌ای از نظر ظرفیت میزبانی و بهبود همزمان عملکرد سیستم ارائه شود.

نتایج نشان داد که استفاده از ذخیره ساز می‌تواند سطح عملیاتی سیستم‌های توزیع را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. با ادغام منابع انرژی سیستم فتوولتائیک پشت بامی، حالت کنترل انعطاف‌پذیر ذخیره ساز همچنین ظرفیت میزبانی سیستم خورشیدی پشت بامی شبکه و قابلیت اطمینان منبع تغذیه افزایش می‌یابد. با توسعه فناوری‌های الکترونیکی قدرت و سیستم‌های توزیع پیچیده، دستگاه‌های توزیع انعطاف‌پذیرتر مانند ذخیره ساز در شبکه‌های توزیع الکتریکی فعال ادغام می‌شوند.

از نتایج به دست آمده برای سناریو دوم مشخص شد که تخصیص ذخیره ساز و سیستم خورشیدی پشت بامی در یک سیستم توزیع، پیکربندی ترکیبی ایجاد می‌کند که مزایای ارائه

شده توسط سیستم‌های توزیع شعاعی را ادغام نموده و معایب مربوط به آن را کاهش می‌دهد. با ارائه عملکرد بسیار کارآمد و بهینه شبکه همچنین، مشخص شد که سهم تلفات داخلی ذخیره‌ساز به کل تلفات بستگی به تعداد ذخیره‌ساز ندارد و حداقل کاهش همیشه توسط نصب ذخیره‌ساز یا سیستم خورشیدی پشت بامی بیشتر همراه نیست. در نهایت، ذخیره‌ساز می‌تواند مسائل مربوط به نقض ولتاژ، ظرفیت میزبانی سیستم خورشیدی پشت بامی و تلفات شبکه را به طور موثر حل کنند تا به ادغام سیستم خورشیدی پشت بامی در سیستم‌های توزیع کمک کند. از تجزیه و تحلیل انجام شده برای شناسایی فرصت‌ها و استراتژی‌های کاهش تلفات شبکه با بهبود طراحی سیستم و بکارگیری فناوری‌های کاهش تلفات، نتیجه گرفته می‌شود که ادغام سیستم خورشیدی پشت بامیو ذخیره‌ساز به همراه بازاریابی به طور همزمان نفوذ ادغام سیستم خورشیدی پشت بامی را با موفقیت بیشتر از سایر سناریوها افزایش می‌دهد.

بر اساس تجزیه و تحلیل انجام شده در راستای شناسایی فرصت‌ها و راهکارهای کاهش تلفات شبکه از طریق بهبود طراحی سیستم و به کارگیری فناوری‌های نوین، این نتیجه حاصل می‌شود که ترکیب سیستم‌های خورشیدی پشت بامی و ذخیره‌سازها عملکرد موفق تری نسبت به سایر سناریوهای بررسی شده دارد. همچنین مدل‌سازی‌ها نشان دادند که استفاده از ذخیره‌سازهای نصب شده در سطح فیدر برای مدیریت محدودیت‌های بهره‌برداری، می‌تواند به طور قابل توجهی در کاهش تلفات شبکه‌های توزیع مدرن مؤثر باشد.

در ادامه، پیشنهاد می‌شود مطالعات بیشتری با هدف توسعه راهبردهای یکپارچه برای افزایش ظرفیت میزبانی شبکه‌های توزیع، به منظور امکان‌پذیر ساختن نفوذ بیشتر سیستم‌های خورشیدی پشت بامی در شبکه‌های متعادل و نامتعادل انجام گیرد. همچنین لازم است بررسی انواع دیگر ذخیره‌سازها نیز در راستای بهبود نتایج و ارتقای قابلیت اتصال آن‌ها مورد توجه قرار گیرد.

از سوی دیگر، یکی از موضوعات خارج از چارچوب این مطالعه که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد، انجام تحلیل هزینه-فایده با استفاده از مدل چندهدفه MINLP در مقیاس وسیع است؛ به منظور ارزیابی هم‌زمان هزینه‌ها و مزایای حاصل از تعیین محل و ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها و سیستم‌های خورشیدی پشت بامی در شبکه‌های توزیع بزرگ مقیاس. علاوه بر این، به کارگیری رویکردهای احتمالاتی نیز برای ارزیابی دقت و کارایی

روش قطعی پیشنهاد می‌شود؛ به‌ویژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در تولید سیستم‌های خورشیدی پشت‌بامی و بار مصرفی.

چندین موضوع قابل توجه ارزش تحقیق بیشتر را دارد. شاخص‌های ظرفیت میزبانی تحت چارچوب احتمال را می‌توان برای ارزیابی کمی ظرفیت میزبانی کل سیستم مورد بررسی قرار داد. از آنجا که سیستم خورشیدی پشت بامی دارای عدم قطعیت قابل توجهی است، ویژگیهای نامشخص آن را می‌توان در ارزیابی ظرفیت میزبانی شبکه‌های توزیع فعال بیشتر در نظر گرفت. با توجه به سرمایه‌گذاری نسبتاً بالای قطعات الکترونیکی قدرت، یکی دیگر از برنامه‌های مناسب این است که منابع مبتنی بر ذخیره ساز را با دستگاه‌های معمولی با واکنش کند مانند OLTC و سوئیچ‌های فیدری هماهنگ کند. انتظار می‌رود این عملیات هماهنگ عملکرد ظرفیت میزبانی عملیاتی را بهبود بخشد.

با این حال، ارزیابی صرفاً اقتصادی، ایده بهتری از امکان اجرای ذخیره ساز خواهد داد زیرا این که در چه مکانی باید هزینه‌ها کاهش یابد تا امکان عملی شدن طرح فراهم شود، اهمیت دارد. مقدار بهینه، مکان و اندازه ذخیره ساز نیز با توجه به هزینه سرمایه ذخیره ساز باید تعیین شود. این مطالعه بر بررسی BTBVSC و VSC در شبکه‌های توزیع متمرکز شده است. در مطالعات بعدی، قابلیت‌های ساختارهای مختلف، در جهت کاهش محدودیت‌های شبکه و قرار دادن سیستم خورشیدی پشت بامی‌های مناسب، ارزیابی و مقایسه شوند. از آن جا در کاربرد عملی، تلفات توان داخلی منعکس کننده بازده دستگاه است که با عوامل بسیاری مانند توان انتقال یافته و پیکربندی دستگاه متفاوت خواهد بود. در مطالعات بعدی، تأثیر تلفات توان دستگاه همراه با کاهش تلفات کلی بررسی شود.

علاوه بر توزیع یا زیرساخت سطح ولتاژ متوسط، امکان نصب جبران الکترونیکی قدرت در سطح ولتاژ پایین نیز وجود دارد. از آنجا که بیشترین هزینه و سود برای تعداد زیادی دستگاه در سطوح پایین است، نصب طراحی تعداد زیادی دستگاه کوچک نیز ممکن است باعث کاهش کلی هزینه دستگاه مورد نیاز برای دستیابی به یک مزیت خاص شود. مهمترین چالش فنی با اجرای در تعداد زیاد، کنترل هماهنگ دستگاه‌ها برای بهینه‌سازی جریان‌های کلی سیستم یا به اشتراک‌گذاری مجدد بارهای جدا شده است.

از آنجا که ماشین‌های القایی و سنکرون معمولاً به شبکه‌های توزیع وصل می‌شوند. این نوع بارها ویژگی مختلفی دارند و از این رو ممکن است منجر به رفتارهای متفاوت گذرا شود. بنابراین، تحقیقات بیشتر در مورد عملکرد دستگاه ذخیره ساز پیشنهادی با انواع مختلف

بارهای شبکه، به منظور نشان دادن یک موقعیت واقعی‌تر، در نظر گرفته شوند. تعامل بین ذخیره ساز و طرح های اتوماسیون موجود فیدر در نظر گرفته شود. علاوه بر این، هماهنگی بین ذخیره ساز و طرح اتوماسیون فیدر موجود برای جلوگیری از اقدامات و رویکردهای کنترل ناهماهنگ برای دستیابی به یک راه‌حل بهینه باید مورد بررسی قرار گیرد.

همچنین معمولاً مصرف‌کنندگان داخلی و برخی از مشتریان تجاری متصل به شبکه توزیع معمولاً دارای اتصالات تک فاز هستند. بنابراین، بار در شبکه‌های توزیع نمی‌تواند کاملاً متعادل باشد. عدم تعادل در تجهیزات سه فاز باید کاهش یابد. ذخیره ساز حاوی یک باس DC معمولی است، از این رو امکان برقراری تبادل توان فوری بین فازها را فراهم می‌کند که برای تعادل جریان توان در فیدرهای متصل استفاده می‌شود. از این رو، برای عملکرد ذخیره ساز باید کنترلرهای جدیدی مورد بررسی قرار گیرند تا شرایط سه فاز نامتوازن را برطرف کنند.

فهرست مراجع

Glover, J. Duncan, Mulukutla S. Sarma, and Thomas Overbye. *Power system analysis & design, SI version*. Cengage Learning, 2012.

Elmubarak, E. S. and A. M. Ali. , "Distributed Generation: Definitions, Benefits, Technologies & Challenges", 2016.

Hannah Ritchie and Max Roser (2020) - "Renewable Energy". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/renewable-energy>' [Online Resource]

Adefarati, T., and R. C. Bansal., "Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation", *Applied energy*, vol. 185, pp. 158-171, 2017.

Jun, X., Wang, Y., Luo, F., Bai, L., Gang, F., Huang, R, Jiang, X., and Zhang, X., "Flexible distribution network: definition, configuration, operation, and pilot project", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 20, pp. 4492-4498, 2018.

Wanyu C., Jianzhong W., Jenkins N., Chengshan W., Green T., "Operating principle of Soft Open Points for electrical distribution network operation", *Applied Energy*, vol. 164, pp. 245-257, 2016.

Bloemink J. M. and Green T. C., "Benefits of Distribution-Level Power Electronics for Supporting Distributed Generation Growth", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 911-919, 2013.

Haijun, X., and Sun, X., "Distributed generation locating and sizing in active distribution network considering network reconfiguration.", *IEEE Access*, vol.5, pp. 14768-14774, 2017.

Attanasio, F., Wasterlain, S., Pidancier, Th., et al, "Low Voltage Soft Open Point with Energy Storage: System Simulation and Prototype Preliminary Test Results", *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM) 2018 International Symposium on*, pp. 254-261, 2018.

Huang , X., Yang , Y., Taylor , GA., "Service restoration of distribution systems under distributed generation scenarios.", *CSEE J Power Energy Syst*, vol. 2, no. 3, pp. 43–50, 2016.

Qin, F., Gao and Yu, A., "A Soft Open Points with Direct AC-AC Modular Multilevel Converter," 2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID), pp. 1-5, 2019.

Qi, Q., Wu, J., "Increasing distributed generation penetration using network reconfiguration and soft open points", *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2169–2174, 2017.

Wang Ch., Song, G., Li, P., et al., "Optimal Configuration of Soft Open Point for Active Distribution Network Based on Mixed-integer Second-order Cone Programming", *Energy Procedia*, vol. 103, pp. 70-75, 2016.

Ismail, M., Hassane, E., Hassan, E.M. and Tijani, L., "Power Losses Minimization in Distribution System Using Soft Open Point", In 2020 1st International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET) , pp. 1-5, 2020.

Cao , W., Wu , J., Jenkins , N., et al., "Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation", *Applied Energy*, vol. 165, pp. 36-47, 2016.

Zhao J., Yao M., Yu H., "Decentralized Voltage Control Strategy of Soft Open Points in Active Distribution Networks Based on Sensitivity Analysis", *Electronics*, vol. 9, no. 2 , p. 295, 2020.

Singh ,V.B., Singh , Sh., Pujan , Sh., "Reduction of energy demand via conservation voltage reduction considering network reconfiguration and soft open point", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, pp. 2050-7038, 2020.

Gu, H., Chu, X. and Tang, M., "Coordinated control of tie switch and soft normally open point for harnessing flexibility in active distribution systems", In *Journal of Physics: Conference Series* , vol. 1176, no. 6, pp. 62-52, 2019.

Qi Q., Jianzhong W., Long C., "Multi-objective operation optimization of an electrical distribution network with soft open point", *Applied Energy*, vol. 208, pp. 734-744, 2017.

Zhang, S., Zhang, L., Li, K., Zhang, H., Lyu, J. and Cheng, H., "Multi-objective planning of Soft Open Point in active distribution network based on bi-level programming", In 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), pp. 3251-3255, 2019.

Li, P., Ji, H., Wang, C., Zhao, J., Song, G., Ding, F. and Wu, J., "Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no.1, pp. 380-391, 2017.

Li, P., Ji, H., Yu, H., Zhao, J., Wang, C., Song, G., Wu, J., "Combined decentralized and local voltage control strategy of soft open points in active distribution networks", *Appl. Energy*, no. 241, pp. 613–624, 2019.

Aithal, A., Li, G., Wu, J., Yu, J., "Performance of an electrical distribution network with soft open point during a grid side AC fault", *Appl. Energy*, vol.227, pp. 262–272, 2018.

Alasdair, B. and Jenkins, N., "Assessing distribution network hosting capacity with the addition of soft open points", pp. 32-6, 2016.

Yin, M. and Li, K., "Optimal Allocation of Distributed Generations with ذخیره ساز in Distribution Systems", 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, 2020.

Xiao, H., Pei, W. and Li, K., "Optimal Sizing and Siting of Soft Open Point for Improving the Three Phase Unbalance of the Distribution Network", 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 2080-2084, 2018.

Diaaeldin, I., Abdel Al., Rafei S., Abdelaziz A., Zobaa A., "Optimal Network Reconfiguration in Active Distribution Networks with Soft Open Points and Distributed Generation", *Energies*, vol. 12, pp. 41-72, 2019.

Zhang, L., Shen, C., Chen, Y., Huang, S. and Tang, W., "Coordinated allocation of distributed generation, capacitor banks and soft open points in active distribution networks considering dispatching results", *Applied energy*, vol. 231, pp.1122-1131, 2018.

Wang, C., Song, G., Li, P., Ji, H., Zhao, J. and Wu, J., "Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks", *Applied energy*, vol. 189, pp. 301-309, 2017.

Ulbjerg A, Andersson G., "Analyzing operational flexibility of electric power systems", *Int J Electr Power Energy Syst*, vol.72, pp.155–64, 2015.

Zhao J., Zheng T., Litvinov E., "A unified framework for defining and measuring flexibility in power system", *IEEE Trans Power Syst*, vol.31 no.1 pp.339–47 2016.

Zhang, T., Wang, J., Li, G., Zhou, M., Zhao, D. and Cui, D., "Unleashing the Flexibility of Renewable-Dominated Distribution Grids via Soft Open Point Planning", In 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), pp. 1-5, 2020.

Huanna, N., Lu, Y., Jingxiang, Z., Yuzhu, W., Weizhou, W. and Fuchao, L., "Flexible-regulation resources planning for distribution networks with a high penetration of renewable energy", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol.12, no. 18, pp. 4099-4107, 2018.

Li, P., Wang, Y., Ji, H., Zhao, J., Song, G., Wu, J. and Wang, C., "Operational flexibility of active distribution networks: Definition, quantified calculation and application" *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 119, p.105872, 2020.

Ji, H., Wang, C., Li, P., Song, G., Yu, H. and Wu, J., "Quantified analysis method for operational flexibility of active distribution networks with high

penetration of distributed generators”, *Applied Energy*, vol. 239, pp.706-714, 2019.

Liu W, Wu J, Wang F, Huang Y, Dai Q, Yang L., "Multi-objective Optimization of Accommodation Capacity for Distributed Generation Based on Mixed Strategy Nash Equilibrium, Considering Distribution Network Flexibility", *Applied Sciences.*, vol. 9, no. 20, pp. 4395, 2019.

i, H., Wang, C., Li, P., Zhao, J., Song, G. and Wu, J., "Quantified flexibility evaluation of soft open points to improve distributed generator penetration in active distribution networks based on difference-of-convex programming", *Applied Energy*, vol. 218, pp. 338-348, 2018.

Yammani, C., Maheswarapu, S. and Matam, S., “Optimal placement of multi سیستم خورشیدی پشت بامی in distribution system with considering the سیستم bus available limits”, *Energy and Power*, vol. 2, no.1, pp.18-23, 2012.

Tiwari, V., Dubey, H.M. and Pandit, M., “Optimal Sizing and Allocation of سیستم خورشیدی پشت بامی in Distribution System Using TLBO”, *Artificial Intelligence and Sustainable Computing*, pp. 409-421, 2022.

Soliman, S. A., "Electrical Load Forecasting: Modeling and Model Construction", Elsevier, 2010.

Mishra, V.L., Madhav, M.K. and Bajpai, R.S., “A Comparative Analysis of Distribution System Load Flow for 33-Bus System”, *International Journal for Electrical and Electronics Engineers*, vol. 8, no. 1, pp.1011-1021, 2016.

Ramadan, H.S., Bendary, A.F. and Nagy, S., “Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 84, pp.143-152, 2017.

[44] CEER. Flexibility use at distribution level - a CEER conclusions paper. Technical report, Council of European Energy Regulators; 2018.

Heggarty T., Bourmaud J-Y., Girard R., Kariniotakis G., “Multi-temporal assessment of power system flexibility requirement”, *Appl Energy*, vol. 238, pp.1327–36, 2019.

Heggarty T., Bourmaud J-Y., Girard R., Kariniotakis G., “Quantifying power system flexibility provision”, *Applied Energy*, vol. 279, pp. 115-852, 2020.

Yang, X., Xu, C., He, H., Yao, W., Wen, J. and Zhang, Y., “Flexibility provisions in active distribution networks with uncertainties”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, pp.553-567, 2020.

Yuan, C., Hu, C. and Li, T., “Review of Congestion Management Methods for Power Systems”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 233, no. 3, p. 32-25, 2019.

Noman Shabbir a,b,*, Lauri Kütt c, Victor Astapov c, Kamran Daniel c, Muhammad Jawad d, Oleksandr Husev c, Argo Rosin c, Jo~ao Martins Applied Energy 372 (2024) 123770

Umar Hanif Ramadhani *, Fatemeh Johari, Oskar Lindberg, Joakim Munkhammar JoakimWidén Applied Energy 371 (2024) 123715

Tingyun Gu *, Qiansu Lv , Qiang Fan , Bowen Li , Chenghui Lin , Houyi Zhang , Junyi Mao Energy Reports 11 (2024) 2266–2278